

# О возможности использования фазовой характеристики кольцевого интерферометра в микрооптических гироскопах

В.Ю.Венедиктов, Ю.В.Филатов, Е.В.Шалымов

*Разработанные на сегодняшний день схемы прототипа микрооптического гироскопа (МОГ) на основе пассивных кольцевых резонаторов предполагают использование только амплитудной характеристики (работают по провалу коэффициента пропускания). Нами проанализирована возможность создания МОГ, в которых используется также и фазовая характеристика. Фазовая характеристика кольцевого интерферометра имеет отличительные особенности вблизи собственных частот резонатора, позволяющие применять ее для определения угловой скорости. Рассмотрен способ определения угловой скорости с использованием фазовой и амплитудной характеристик интерферометра.*

**Ключевые слова:** фазовая характеристика, интерферометр, микрооптический гироскоп.

## 1. Введение

Потребность в недорогих компактных чувствительных элементах для инерциальных систем ориентации и навигации привела к появлению микромеханических гироскопов, активно развивающихся в настоящее время. Однако чувствительность современных микромеханических гироскопов к линейным ускорениям, вибрациям и ударным воздействиям ограничивает область их применения (см., напр., [1, 2]). В то же время продолжается развитие оптических (лазерных и волоконно-оптических) гироскопов, характеризующихся высокой точностью, практически не чувствительных к продольным ускорениям и работающих в большом диапазоне скоростей [3, 4]. Основными недостатками оптических гироскопов являются их сравнительно высокая стоимость и большие размеры.

Развитие интегральной оптики создало базу для проведения работ, направленных на существенное снижение габаритных размеров и стоимости оптических гироскопов. Наиболее интересным вариантом оптического гироскопа с точки зрения его миниатюризации является микрооптический гироскоп (МОГ) с пассивным кольцевым резонатором на основе утолщенных волноводов в планарном исполнении [5, 6].

На сегодняшний день все известные прототипы МОГ предполагают использование амплитудной характеристики (работают по провалу или пику коэффициента пропускания) кольцевого интерферометра для определения

разности собственных частот его резонатора, пропорциональной угловой скорости. В настоящей работе рассматривается принцип работы МОГ, основанный на измерении коэффициента пропускания, анализируется возможность создания МОГ, в которых в качестве альтернативы только амплитудной характеристике применяется фазовая характеристика, а также описывается способ определения угловой скорости с использованием фазовой и амплитудной характеристик интерферометра.

## 2. Принцип работы МОГ

Рассмотрим принцип работы МОГ на примере схемы с пассивным кольцевым резонатором (ПКР), приведенной на рис.1.

Излучение лазера 1 делится Y-образным разветвителем 2 на два канала. Фазовые модуляторы 3 и 4 изменяют частоты проходящих через них сигналов. Система содержит три направленных ответвителя – 7, 8 и 9. С помощью ответвителя 9 излучение из обоих каналов вводится в резонатор кольцевого интерферометра 10 (кольцевой волновод диаметром несколько сантиметров) во взаимно противоположных направлениях (по часовой стрелке и против нее). Через ответвители 7, 8 и 9 излучение из ПКР направляется на фотоприемники 5 и 6, сигналы с которых поступают в вычислительную систему 11.

Если МОГ не вращается относительно инерциальной системы координат, то интенсивности излучения на при-

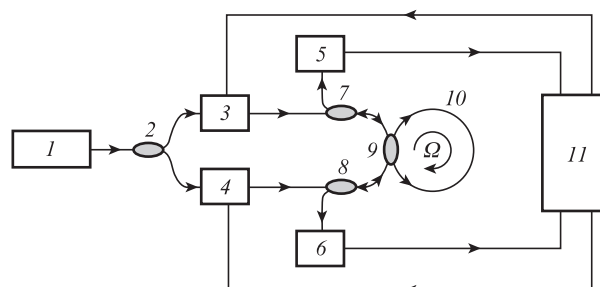


Рис.1. Функциональная схема МОГ с ПКР (обозначения см. в тексте).

**В.Ю.Венедиктов.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, Россия, 198504 С.-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, 3; e-mail: vlad.venediktov@mail.ru

**Ю.В.Филатов, Е.В.Шалымов.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; e-mail: yvfilatov@mail.eltech.ru

Поступила в редакцию 29 января 2014 г., после доработки – 11 апреля 2014 г.

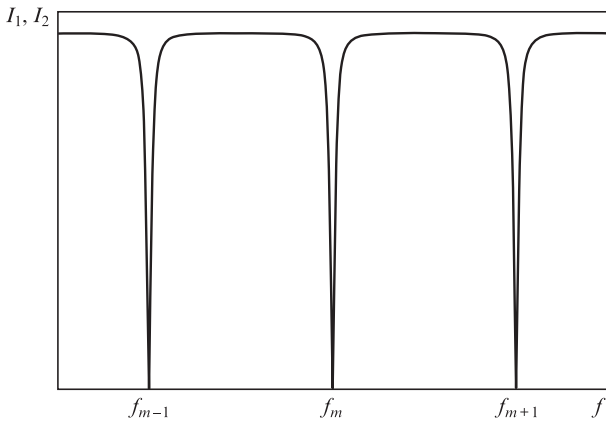


Рис.2. Интенсивность излучения на фотоприемниках при отсутствии вращения МОГ;  $f_m$  – резонансная частота ПКР.

емниках 5 и 6 ( $I_1$  и  $I_2$  соответственно) изменяются в зависимости от его частоты согласно рис.2. При этом положения провалов амплитудной характеристики совпадают с собственными (резонансными) частотами ПКР  $f_m$ . Если частота лазерного излучения не равна собственной частоте ПКР, то излучение практически не поглощается резонатором и достигает фотодетекторов. Если частота излучения является резонансной, то оно поглощается кольцевым волноводом и затем диссипирует в нем, т.к. кольцевые волноводы с диаметром несколько сантиметров обычно характеризуются достаточно большими потерями – несколько децибел за один оборот. При отсутствии вращения МОГ собственные частоты ПКР для встречных волн равны и определяются выражением

$$f_m = mcl(nL), \tag{1}$$

где  $m$  – целое положительное число;  $c$  – скорость распространения света в вакууме;  $n$  – показатель преломления материала волновода;  $L$  – периметр резонатора.

При вращении МОГ в плоскости рис.1 собственные частоты резонатора расщепляются в результате эффекта Саньяка, и интенсивности излучения на приемниках 5 и 6 изменяются в зависимости от его частоты в соответствии с рис.3. При этом разность собственных частот определяется выражением

$$f_{mccw} - f_{mcw} = \frac{4S}{\lambda_m L} \Omega, \tag{2}$$

где  $S$  – площадь резонатора;  $\lambda_m = c/f_m$ ;  $\Omega$  – угловая скорость вращения МОГ в плоскости рис.1.

В большинстве разработанных прототипов МОГ вычислительная система вырабатывает сигнал обратной связи для модуляторов, подстраивает частоты каналов под собственные частоты резонатора, определяет разность частот и вычисляет соответствующую ей угловую скорость, т.е. для измерения угловой скорости используется амплитудная характеристика кольцевого интерферометра.

Кроме рассмотренной выше схемы МОГ на основе кольцевого интерферометра с одной петлей оптической связи между кольцевым и вспомогательным волноводами, существуют и другие варианты реализации МОГ. Например, известна схема МОГ на основе кольцевого интерферометра с двумя петлями оптической связи, одна из которых предназначена для ввода излучения в резонатор,

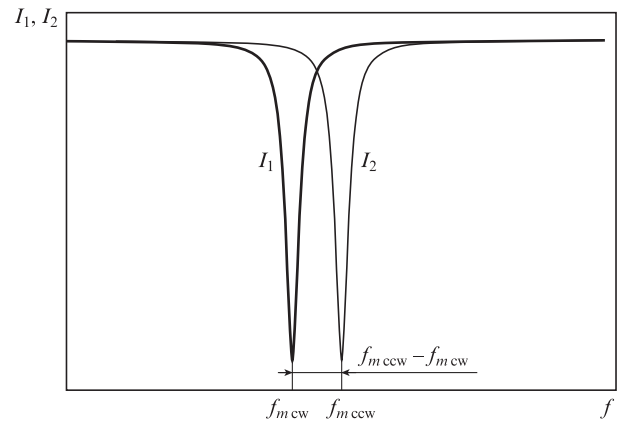


Рис.3. Интенсивности излучения на приемниках 5 и 6 при вращении МОГ;  $f_{mcw}$  и  $f_{mccw}$  – резонансные частоты ПКР для волн, распространяющихся по часовой стрелке и против нее соответственно.

а другая – для его вывода. Однако в этом случае усложняется конструкция кольцевого интерферометра и увеличиваются потери энергии излучения.

### 3. Модель кольцевого интерферометра с потерями

Чувствительным элементом МОГ является кольцевой интерферометр. В разрабатываемых в настоящее время МОГ используются кольцевые интерферометры с диаметром резонатора менее 2 см. Такой интерферометр схематически изображен на рис.4. Излучение заводится в интерферометр через левый конец вспомогательного волновода, а выводится через правый [7].

При прохождении излучения с напряженностью электрического поля  $A_0$  через область вспомогательного волновода, оптически связанную с кольцевым резонатором, часть энергии волны переходит из вспомогательного волновода в кольцевой резонатор. Напряженность электрического поля этой части волны равна  $A_0\sqrt{K_c}$ , где  $K_c$  – энергетический коэффициент связи вспомогательного волновода с кольцевым резонатором. Часть исходной волны остается во вспомогательном волноводе, ее напряженность составляет  $A_0\sqrt{1-K_c}$ . При прохождении излучения с напряженностью электрического поля  $B_0$  через область кольцевого резонатора, оптически связанную со вспомогательным волноводом, часть волны остается в резонаторе, а другая переходит во вспомогательный волновод. Напряженность поля волны, перешедшей во вспомогательный волновод, равна  $B_0\sqrt{K_c}$ , а волны, оставшейся

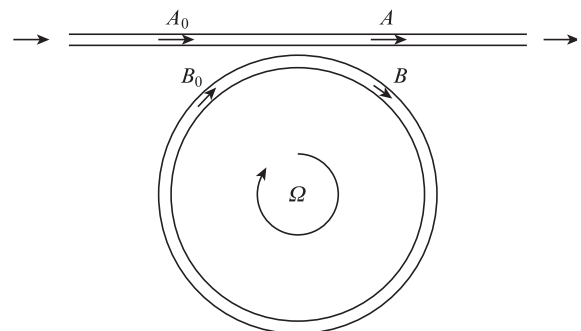


Рис.4. Принципиальная схема кольцевого интерферометра.

ся в резонаторе,  $-B_0\sqrt{1-K_c}$ . Учитывая, что при переходе излучения из одного оптически связанного волновода в другой наблюдается скачок фазы в  $\pi/2$  [8], напряженности электрического поля  $A_0, A, B_0$  и  $B$  (рис.4) можно связать между собой следующими выражениями:

$$A = A_0\sqrt{1-K_c} - iB_0\sqrt{K_c}, \tag{3}$$

$$B = -iA_0\sqrt{K_c} + B_0\sqrt{1-K_c}, \tag{4}$$

$$B_0 = B \exp\left(-\frac{\rho}{2}L - i\beta L\right), \tag{5}$$

где  $\rho$  – параметр, определяющий потери мощности излучения, при этом  $P = 1 - \exp(-\rho L)$  – доля мощности, теряемая за один обход резонатора;  $\beta$  – постоянная распространения.

Для простоты будем пренебрегать потерями во вспомогательном волноводе и в оптическом ответвителе. Введем обозначения:

$$x = \exp\left(-\frac{\rho}{2}L\right), \tag{6}$$

$$y = \sqrt{1-K_c}, \tag{7}$$

$$\delta = \beta L = \frac{2\pi}{\lambda} N_{\text{eff}} L = \frac{\omega N_{\text{eff}} L}{c}, \tag{8}$$

где  $\delta$  – набег фазы при однократном обходе волной периметра резонатора;  $N_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления волновода;  $\lambda$  – длина волны оптического из-

лучения в вакууме;  $\omega$  – циклическая частота оптического излучения.

Используя выражения (3)–(8), путем несложных преобразований получаем формулу для отношения напряженностей полей  $A$  и  $A_0$ :

$$\frac{A}{A_0} = \frac{y - \exp(-i\delta)}{1 - xy \exp(-i\delta)}. \tag{9}$$

Легко видеть, что энергетический коэффициент пропускания кольцевого интерферометра  $T$  (отношение интенсивностей на выходе и на входе интерферометра) равен квадрату модуля выражения (9), а сдвиг фазы волны при прохождении через интерферометр  $\Delta\Phi$  – аргументу комплексного выражения (9).

На рис.5 приведены зависимости  $T(\delta)$ , построенные с использованием выражений (6)–(9). Видно, что с ростом  $K_c$  глубина провала коэффициента пропускания увеличивается (рис.5,а), а при снижении потерь она уменьшается (рис.5,б). Соответственно при отсутствии в резонаторе потерь амплитудная характеристика не имеет провалов на собственных частотах резонатора (рис.5,б). Провалы коэффициента пропускания отвечают условию резонанса, когда фазовый сдвиг  $\delta = 2\pi m$  (длина пути излучения в резонаторе кратна целому числу длин волн), где  $m$  – целое число.

Из рис.6 видно, что крутизна фазовой характеристики и ее максимальное значение увеличиваются как при снижении потерь, так и с ростом  $K_c$ . При изменении набега фазы за один обход резонатора  $\delta$  (при изменении частоты излучения или периметра резонатора)  $\Delta\Phi$  изменяется

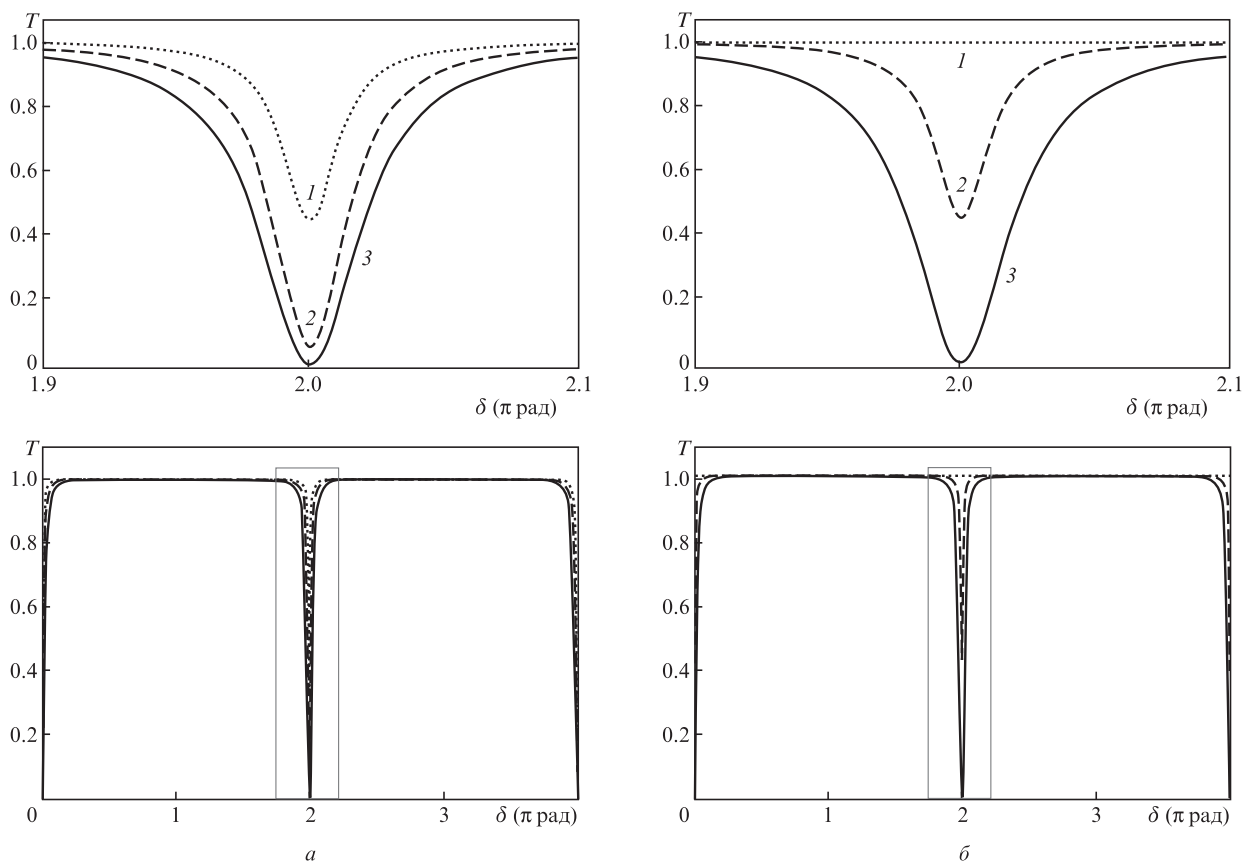


Рис.5. Коэффициенты пропускания интерферометра, рассчитанные для  $K_c = 0.01$  (1),  $0.03$  (2) и  $0.06$  (3),  $P = 5\%$  (а) и для  $P = 0$  (1),  $1\%$  (2) и  $6\%$  (3),  $K_c = 0.05$  (б).

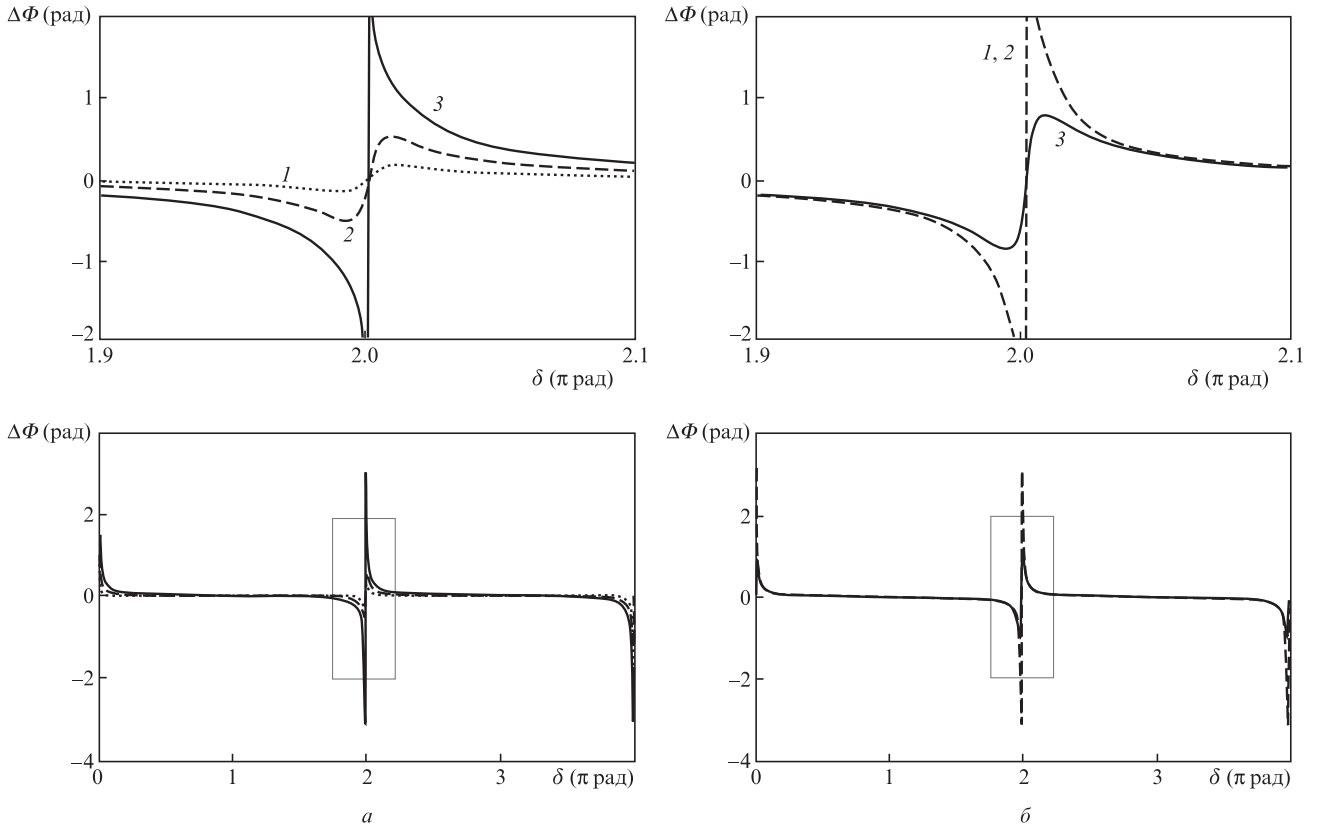


Рис.6. Сдвиги фазы волны при прохождении через интерферометр, рассчитанные для  $K_c = 0.01$  (1),  $0.03$  (2) и  $0.06$  (3),  $P = 5\%$  (а) и  $P = 0$  (1),  $1\%$  (2) и  $6\%$  (3),  $K_c = 0.05$  (б).

по периодическому закону в пределах интервала, ширина которого определяется уровнем потерь и величиной коэффициента связи (максимальный интервал  $[-\pi; \pi]$ ). При резонансе ( $\delta = 2\pi m$ ) крутизна фазовой характеристики максимальна, а  $\Delta\Phi = 0$ . Вблизи резонансной частоты фазовая характеристика близка к линейной. Характеристику с такими свойствами заманчиво использовать в МОГ для определения резонансных частот.

Как уже отмечалось ранее, при вращении кольцевого интерферометра его амплитудная характеристика расщепляется для волн, обходящих резонатор во взаимно противоположных направлениях (см. рис.3). Также происходит расщепление фазовой характеристики кольцевого интерферометра (рис.7). На рис.7 приведены зависимости от частоты сдвигов фазы  $\Delta\Phi_1$  и  $\Delta\Phi_2$  при прохождении че-

рез кольцевой интерферометр для волн, обходящих резонатор интерферометра по часовой стрелке и против нее соответственно. Такое расщепление фазовых характеристик происходит при вращении интерферометра по часовой стрелке. Разность собственных частот пропорциональна скорости вращения (см. выражение (2)).

#### 4. Использование фазовой характеристики кольцевого интерферометра в МОГ

Все известные на сегодняшний день прототипы МОГ предполагают использование только амплитудной характеристики (см., напр., [9–12]) для определения разности собственных частот резонатора, пропорциональной угловой скорости его вращения. Результаты анализа характеристик кольцевого интерферометра показывают, что фазовая характеристика имеет отличительные особенности вблизи собственных частот резонатора. Измерить фазу оптического сигнала напрямую нельзя, однако информацию о ней можно получить, как, например, в случае волоконно-оптических гироскопов [4], из интерференционной картины. Можно создать МОГ, в которых для определения разности собственных частот резонатора интерферометра (угловой скорости МОГ) используется только фазовая характеристика, а также МОГ, в которых используется как фазовая, так и амплитудная характеристика интерферометра. Нами ведутся исследования в обоих направлениях. В результате этих исследований разработан способ определения угловой скорости с применением фазовой и амплитудной характеристик кольцевого интерферометра. Рассмотрим этот способ на примере работы реализующего его устройства.

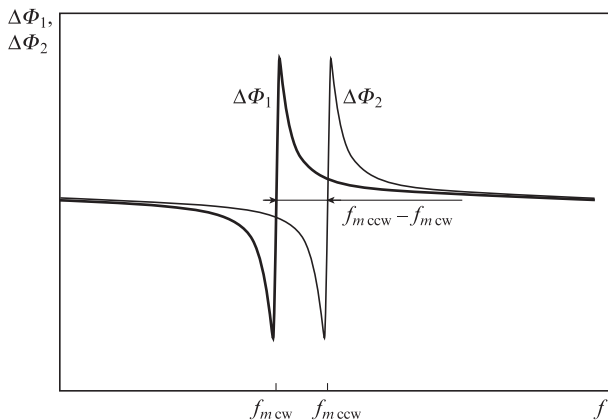


Рис.7. Расщепление фазовой характеристики кольцевого интерферометра при его вращении.

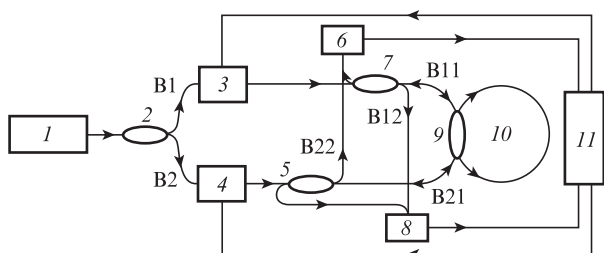


Рис.8. Функциональная схема МОГ, в котором используются фазовая и амплитудная характеристики кольцевого интерферометра (обозначения см. в тексте).

Схема устройства показана на рис.8. Оно состоит из лазера 1, оптических ответвителей 2, 5, 7, 9, фазовых модуляторов 3, 4, фотоприемников 6, 8, кольцевого интерферометра 10, соединенных между собой оптическими волноводами, и вычислительной системы 11. Излучение лазера делится оптическим ответвителем 2 на две волны – В1 и В2 (оптимальным с точки зрения точности определения угловой скорости является деление на две волны равной интенсивности). Затем волны В1 и В2 проходят через фазовые модуляторы 3 и 4, управляемые вычислительной системой 11. В них происходит периодическое изменение частоты по линейному закону. Полученные частотно-модулированные волны направляются оптическими ответвителями 7 и 5: волна В1 – на волны В11 и В12, а волна В2 – на волны В21 и В22. Опорные волны В12 и В22 направляются на фотоприемники 6 и 8, а волны В11 и В21 – в кольцевой интерферометр 10, при прохождении через который изменяются их параметры (интенсивность и фаза). Ввод излучения в резонатор этого интерферометра и вывод из него осуществляются с помощью одной и той же петли оптической связи, которая представляет собой направленный оптический ответвитель 9. С выходов интерферометра сигналы измерительной информации В11 и В21 через ответвители 7 и 5 направляются на фотоприемники 6 и 8. Таким образом, фотоприемник 6 регистрирует интерференционную картину волн В11 и В12, а фотоприемник 8 – волн В21 и В22. Для простоты рассмотрим случай, когда разность оптических длин путей опорных сигналов и сигналов измерительной информации пропорциональна целому числу длин волн  $\lambda_m$ . Зависимости интенсивностей оптического излучения, падающего на фотоприемники 6 и 8 ( $I_6$  и  $I_8$  соответственно), от его частоты для этого случая приведены на рис.9.

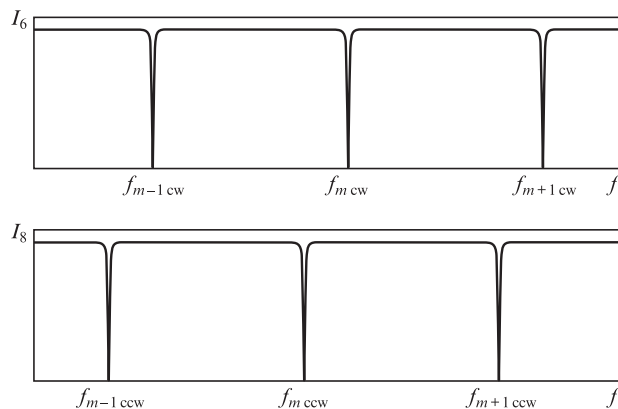


Рис.9. Зависимости интенсивностей излучения, падающего на фотоприемники 6 и 8, от его частоты при  $K_c = 0.05$  и  $P = 0$ .

ющего на фотоприемники 6 и 8 ( $I_6$  и  $I_8$  соответственно), от его частоты для этого случая приведены на рис.9.

Собственным частотам резонатора  $f_{m cw}$  и  $f_{m ccw}$  (для волн, обходящих его по часовой стрелке и против нее) отвечают минимумы интенсивности оптического излучения. По минимумам сигналов с фотоприемников вычислительная система 11 определяет собственные частоты, а затем их разность  $\Delta f$ , пропорциональную угловой скорости. Когда разность оптических длин путей опорных сигналов и сигналов измерительной информации не пропорциональна целому числу длин волн  $\lambda_m$ , форма зависимостей, приведенных на рис.9, изменяется. Тем не менее при любой разности оптических длин путей сохраняется возможность определения резонансных частот по характерным изменениям интенсивности падающего на фотоприемники излучения вблизи собственных частот резонатора.

Чувствительность МОГ зависит от уровня потерь в резонаторе кольцевого интерферометра: чем меньше потери, тем выше чувствительность [2]. Как уже отмечалось ранее, в отсутствие потерь в резонаторе кольцевого интерферометра амплитудная характеристика не имеет провалов на собственных частотах резонатора, т.е. в отсутствие потерь определить угловую скорость по провалам амплитудной характеристики невозможно. Стоит отметить, что в реальных кольцевых интерферометрах всегда имеются потери ( $P \neq 0$ ). Однако потери можно компен-

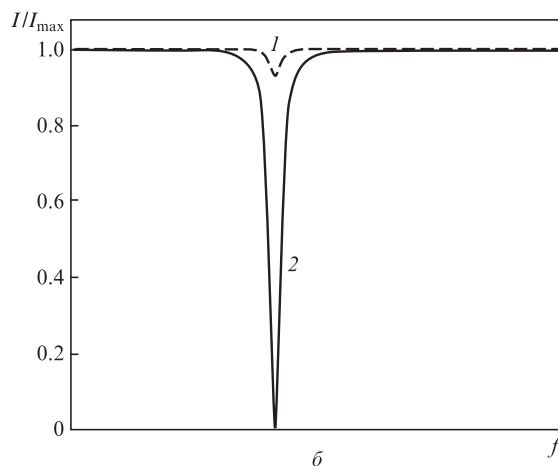
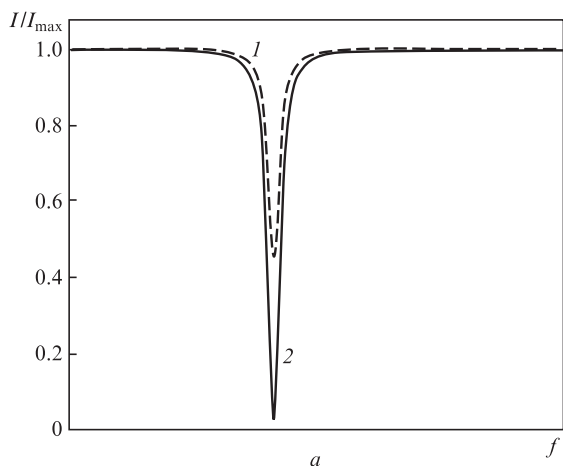


Рис.10. Относительная интенсивность излучения, падающего на фотоприемник МОГ, при  $K_c = 0.05$ ,  $P = 1\%$  (а) и  $K_c = 0.05$ ,  $P = 0.1\%$  (б) для МОГ, в которых используется только амплитудная характеристика кольцевого интерферометра (1) или амплитудная и фазовая характеристики (2).

сировать, реализовав усиление внутри планарного волновода [9]. При использовании в МОГ фазовой характеристики сохраняется возможность определения угловой скорости даже при полной компенсации потерь (рис.9).

При сравнительно низких потерях в резонаторе кольцевого интерферометра совместное использование амплитудной и фазовой характеристик позволяет увеличить глубину провала и крутизну выходной характеристики (рис.10). При  $K_c = 0.05$  и  $P = 1\%$  максимальная крутизна выходной характеристики МОГ, в котором используются амплитудная и фазовая характеристики кольцевого интерферометра, превышает таковую для МОГ, в котором используется только амплитудная характеристика, почти в два раза, а при снижении потерь до  $0.1\%$  – более чем в 13 раз.

## 5. Заключение

В работе рассмотрен принцип работы МОГ, основанный на использовании амплитудной характеристики кольцевого резонатора. Фазовая характеристика кольцевого интерферометра имеет отличительные особенности вблизи собственных частот резонатора, которые позволяют применять ее для определения скорости вращения. Рассмотрен также пример реализации способа измерения угловой скорости с использованием фазовой и амплитудной характеристик кольцевого интерферометра. В даль-

нейшем планируется продолжить разработку МОГ, в которых применяется фазовая характеристика.

В.Ю.Венедиктов является исполнителем работы «Организация проведения научных исследований» базовой части государственного задания Минобрнауки России. Моделирование кольцевого интерферометра выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда №14-19-00693.

1. Schmidt G.T., in *Advances in Navigation Sensors and Integration Technology* (NATO RTO Lecture Series, 2004).
2. Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.Ф. *Оптические и микромеханические инерциальные приборы* (СПб.: Изд-во «Элмор», 2008).
3. Chow W.W., Gea-Banacloche J., Pedrotti L.M., Sanders V.E., Schleich W., Scully M.O. *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 61 (1985).
4. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscope* (Norwood, USA, Artech House Inc., 1993).
5. Ford C., Ramberg R., Johnson K. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, №12, 33 (2000).
6. Li G., Winick K.A., Youmans B. *Proc. ION 60th Annual Meeting* (Dayton, Ohio, 2004).
7. Bismuth J., Revol P., Valette S. *Electron. Lett.*, **27**, 722 (1991).
8. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. *Волноводная фотоника. Учебное пособие, курс лекций* (СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008).
9. Hsien-kai Hsiao, Winick K.A. *Opt. Express*, **15** (26), 17783 (2007).
10. Terrel M., Dignonnet M.J.F., Fan Sh. *Laser Photonics Rev.*, **3** (5), 452 (2009).
11. Wang X., He Z., Hotate K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7314**, 731402 (2009).
12. Mao H., Ma H., Jin Z. *Opt. Express*, **19** (5), 4632 (2011).