

Изобретение относится к области приборостроения и может быть использовано для измерения угловых скоростей в авиационной и космической технике, а также в геодезических системах.

Известен способ измерения угловой скорости, основанный на прохождении исследуемой волны через измерительный преобразователь в объекте исследования, одновременным направлением на фотодетектор когерентной ей опорной волны, регистрации суммарной интенсивности на выходе интерферометра, аргументом которой является разность фаз волн, прошедших по разным плечам интерферометра, выводе информации об измеряемой величине путем компенсации изменения фазового угла в опорном канале [Патент Франции № 2580072, кл. G 01J 9/02, G 02 B 6/42, БИ № 5, 1987].

В известном способе излучение направляется по разным плечам интерферометра, а информация об измеряемой величине выводится на дисплей путем компенсации изменения фазового угла в опорном канале. В этом способе достигается стабильная работа при низкой чувствительности измерения, так как осуществлена компенсация изменения фазового угла.

Известен способ измерения угловой скорости, основанный на расщеплении оптического излучения на полупрозрачном зеркале, одновременном пропускании первого расщепленного оптического луча через волоконно-оптическую катушку по часовой стрелке, а второго – против часовой стрелки, совмещении противоположно бегущих лучей на этом же полупрозрачном зеркале и образовании интерференционной картины на фотодетекторе с последующим вычислением в блоке обработки скорости углового вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси, причем для максимизации чувствительности к малым изменениям скорости углового вращения в волоконном контуре с помощью невзаимного фазового модулятора обеспечивают "невзаимный" фазовый сдвиг $\pi/2$ между двумя противоположно бегущими лучами [Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. М., "Радио и связь", 1987, с.7, 24].

Способ измерения, в котором выполняются только выше упомянутые операции, обеспечивает стабильную работу при низкой чувствительности, так как также осуществлена компенсация изменения фазового угла.

Известен также способ измерения угловой скорости, включающий разделение оптического излучения на две волны, распространяющиеся в катушке волоконного световода во встречных направлениях, сдвиг частоты одной из волн до ее вхождения в катушку волоконного световода, а частоту другой волны сдвигают на то же значение после прохождения ею катушки волоконного световода, совмещение встречно распространяющихся волн, образующих интерференционную картину, измерение электрического напряжения на оптическом приемнике с последующим вычислением скорости углового вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси. При этом скорость углового вращения вычисляют по следующей зависимости

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta f n \lambda}{2 r},$$

где Δf - сдвиг частоты модулятора, приводящий к компенсации напряжения оптического приемника, вызванного сдвигом фазы Саньяка;

λ - длина волны оптического излучения, распространяющегося в волоконно-оптической катушке;

n - показатель преломления оптического волокна катушки;

r - радиус катушки.

Чувствительность измерения угловой скорости определена следующим образом:

$$\alpha = \frac{K}{1 + \gamma K},$$

где K - коэффициент усиления преобразования изменения угловой скорости;

γ - значение степени обратной связи. [Патент США № 4299490, кл. G 01 C 19/64, опублик. 10.11.81].

Способ измерения осуществляется при низкой чувствительности α , но не обеспечивает стабильную работу при высокой чувствительности, исключаяющего компенсацию изменения фазового угла.

Известно устройство для измерения угловой скорости, содержащее два волоконных световода, соединенных с источником когерентного света, измерительный преобразователь, установленный в первом световоде, опорный преобразователь, установленный во втором световоде, направленное оптико-электронное соединительное устройство, блок обработки информации [Патент Франции № 2580072].

В устройстве, в котором применены два волоконных световода, не может быть достигнута стабильность при высокой чувствительности измерения угловой скорости.

Известно устройство для измерения угловой скорости, содержащее источник оптического излучения, полупрозрачное зеркало, волоконно-оптическую катушку, фотодетектор, фазовый модулятор, блок обработки информации [Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп].

Наличие фотодетектора, фазового модулятора, блока обработки информации, а также их связи не могут обеспечить стабильную работу при высокой чувствительности измерения угловой скорости.

Известно также устройство для измерения угловой скорости, приведенное в способе-прототипе, содержащее оптически сопряженные источник оптического излучения и расщепитель оптического излучения, волоконно-оптическую катушку, оптически сопряженную первым выходом-входом с расщепителем оптического излучения по его первой оптической оси, частотный модулятор, оптически сопряженный входом с выходом расщепителя оптического излучения по его второй оптической оси, а выходом - со вторым выходом-входом волоконно-оптической катушки, генератор, соединенный выходом с электрическим входом частотного модулятора, приемник оптического излучения, оптически сопряженный с расщепителем по его первой оптической оси, блок вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси с дисплеем и аналого-цифровым преобразователем, соединенными соответственно по первому и второму вводу-выводу. Выполнение источника оптического излучения, позволяющего регистрировать только минимум или максимум интерференционной полосы, и его связи с известными элементами не обеспечивают стабильную работу устройства при высокой чувствительности измерения

угловой скорости.

В основу изобретения поставлена задача создать такой способ и устройство для измерения угловой скорости, в которых введение новых операций и новое вычисление скорости углового вращения волоконно-оптической катушки в способе, новое выполнение приемника оптического излучения и введение новых элементов в устройстве, позволило бы обеспечить стабильность работы при высокой чувствительности измерения угловой скорости.

Поставленная задача достигается тем, что в способе измерения угловой скорости, включающем разделение оптического излучения на две волны, распространяющиеся в катушке волоконного световода во встречных направлениях, сдвигают частоту одной из волн до ее вхождения в катушку волоконного световода, а частоту другой волны сдвигают на то же значение после прохождения ею катушки волоконного световода, совмещая встречно распространяющихся волн, образующих интерференционную картину, измерение электрического напряжения на оптическом приемнике с последующим вычислением скорости углового вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси, согласно изобретению, после совмещения встречно распространяющихся волн и образования интерференционной картины изменяют частоту сдвига волн и регистрируют максимум и минимум интерференционной полосы, устанавливают среднеарифметическое значение полученных электрических напряжений, затем изменяют частоту сдвига волн на среднеарифметическое электрическое напряжение, вводят дополнительное первое воздействие частотой сдвига волн, создающее эффект дополнительного изменения фазы Саньяка, измеряют первое и второе электрические напряжения, вычитают из первого второе электрическое напряжение, вводят дополнительное второе воздействие частотой сдвига волн, измеряют третье и четвертое электрические напряжения, вычитают из третьего четвертое электрическое напряжение, преобразуют два разностные напряжения к напряжению, которое не изменяется от установленных чередующихся первого и второго дополнительных воздействий, а скорость углового вращения определяют из следующего выражения

$$\dot{\theta} = \left[\frac{U_7 A k (\eta^2 - 1)}{\eta (k^2 - 1)} \right] \frac{\lambda c}{8 \pi N a},$$

где U_7 — напряжение, которое не изменяется от установленных чередующихся первого и второго дополнительных воздействий;

A — крутизна преобразования электрического напряжения в фазовый угол Γ

k, n — числа из действительного ряда чисел, при этом $n \neq 0, k \neq 1$;

L — длина волны оптического излучения, распространяющегося в* волоконно-оптической катушке;

c — скорость света;

N — количество витков в катушке;

a — площадь одного витка.

Поставленная задача достигается также тем, что устройство, содержащее оптически сопряженные источник оптического излучения и расщепитель оптического излучения, волоконно-оптическую катушку, оптически сопряженную своим первым выходом-входом с расщепителем оптического излучения по его первой оптической оси, частотный модулятор, оптически сопряженный входом с выходом расщепителя оптического излучения по его второй оптической оси, а выходом — со вторым выходом-входом волоконно-оптической катушки, генератор, соединенный выходом с электрическим входом частотного модулятора, приемник оптического излучения, оптически сопряженный с расщепителем оптического излучения по его первой оптической оси, блок вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси с дисплеем и аналого-цифровым преобразователем, соединенными соответственно по первому и второму оперативному вводу-выводу, согласно изобретению снабжено дифференциальным усилителем, цифроаналоговым преобразователем, при этом дифференциальный усилитель первым и вторым входами соединен соответственно с первым и вторым выходами приемника оптического излучения, третьим входом — с выходом цифроаналогового преобразователя, а блок вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси с дисплеем третьим оперативным вводом-выводом соединен с генератором, а четвертым — с цифроаналоговым преобразователем, причем приемник оптического излучения выполнен с одновременной пространственной настройкой регистрации максимума и минимума интерференционной полосы.

Выполнение приемника оптического излучения с одновременной пространственной настройкой регистрации максимума и минимума интерференционной полосы, его связи с введенным дифференциальным усилителем и цифроаналоговым преобразователем и с известными элементами позволило определять скорость углового вращения с учетом крутизны преобразования электрического напряжения в фазовый угол, что привело к стабильности работы при высокой чувствительности измерения угловой скорости.

Изменение частоты сдвига волн и регистрация максимума и минимума интерференционной полосы после операции совмещения встречно распространяющихся волн с образованием интерференционной картины с последующим установлением среднеарифметического значения измеренных электрических напряжений, введение дополнительных воздействий частотой сдвига волн, создающих эффект дополнительного изменения фазы Саньяка, измерение четырех электрических напряжений и преобразование их разницы в напряжение, которое не изменяется от дополнительных воздействий и измерение Θ путем использования полученных данных по напряжению U_7 , крутизне преобразования электрического напряжения в фазовый угол, длине волны оптического излучения, скорости света, количеству витков в катушке и площади одного витка привело к стабильности работы при высокой чувствительности измерения угловой скорости.

Сущность предлагаемого способа заключается в следующем.

Оптическое излучение от источника оптического излучения разделяют на две волны, распространяющиеся в катушке волоконного световода во встречных направлениях. В результате

совмещения излучений образуется интерференционная картина, интенсивность полос которой определяется разностью фаз и интенсивностью интерферируемых пучков излучений. Приемник оптического излучения с двумя чувствительными элементами конструктивно одновременно настраивают на минимум и максимум интерференционной полосы.

$$I_3 = I_1 + I_2 - 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2), \quad (1)$$

$$I_4 = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2), \quad (2)$$

где I_1, I_2 — интенсивности интерферируемых волн;

I_3, I_4 — интенсивности соответственно минимума и максимума интерференционной полосы;

Φ_1 — фаза волны, смещенная по частоте на значение Ω , до ее вхождения в волоконно-оптическую катушку;

Φ_2 — фаза волны, частота которой изменяется на значение Ω после прохождения волоконно-оптической катушки. При этом фазу волны Φ_1 можно представить в виде

$$\Phi_1 = (\omega + \Omega) \tau + (\omega + \Omega) \Delta \tau_c, \quad (3)$$

где ω — угловая частота исходного оптического излучения;

$$\tau = \frac{L n}{c} - \text{ время задержки при распространении волны в катушке;}$$

L — длина оптического волокна катушки;

n — показатель преломления оптического волокна;

c — скорость света в вакууме;

$\Delta \tau_c$ — дополнительное время задержки распространения излучения, вызванное вращением волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси.

Фаза волны Φ_2 может быть представлена аналогичным образом;

$$\Phi_2 = \omega \tau - \omega \Delta \tau_c. \quad (4)$$

После вычитания из выражения (3) выражения (4) получают

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_1 = \Phi_1 - \Phi_2 &= \omega \tau + \Omega \tau + \omega \Delta \tau_c + \\ &+ \Omega \Delta \tau_c - \omega \tau + \omega \Delta \tau_c = \Omega \tau + \\ &+ 2 \omega \Delta \tau_c + \Omega \Delta \tau_c \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначим фазовый сдвиг Саньяка $\Delta \varphi_c = 2 \omega \Delta \tau_c + \Omega \Delta \tau_c$. Выходят на рабочий режим путем

установления первоначальной разности фаз между встречно распространяющимися волнами $\Omega \tau = \frac{\pi}{2}$, что максимизирует чувствительность волоконно-оптического гироскопа. Для упрощения расчетов предполагают

$$I_1 = I_2 = I_{\text{вых}}$$

Тогда выражения (1) и (2) принимают вид

$$\begin{aligned} I_3 &= 2 I_{\text{вых}} (1 - \cos \Delta \Phi_1) = 2 I_{\text{вых}} [1 - \\ &- \cos(\frac{\pi}{2} + \Delta \varphi_c)] = 2 I_{\text{вых}} (1 + \sin \Delta \varphi_c), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_4 &= 2 I_{\text{вых}} (1 + \cos \Delta \Phi_1) = 2 I_{\text{вых}} [1 + \\ &+ \cos(\frac{\pi}{2} + \Delta \varphi_c)] = 2 I_{\text{вых}} (1 - \sin \Delta \varphi_c). \end{aligned} \quad (7)$$

Измеряют электрические напряжения на выходе оптического приемника

$$U_1 = 2 I_{\text{вых}} S (1 + \sin \Delta \varphi_c), \quad (8)$$

$$U_2 = 2 I_{\text{вых}} S (1 - \sin \Delta \varphi_c), \quad (9)$$

где S — чувствительность оптического приемника излучения.

Для малых угловых сдвигов фаз принимают $\Delta \varphi_c = \sin \Delta \varphi_c$.

С учетом вводимого обозначения $2 I_{\text{вых}} S = U_0$ уравнения (8) и (9) принимают вид

$$U_1 = U_0 + U_0 \Delta \varphi_c, \quad (10)$$

$$U_2 = U_0 - U_0 \Delta \varphi_c. \quad (11)$$

Вычитая из уравнения (10) уравнение (11), получают

$$U_3 = U_1 - U_2 = 2 U_0 \Delta \varphi_c. \quad (12)$$

Вводят дополнительное воздействие, изменяя частоту сдвига волн оптического излучения, создающее эффект дополнительного изменения фазы Саньяка. Выражение (12) с учетом дополнительного сдвига фаз $\delta_1 \varphi_c$ пропорционально выходного электрического напряжения будет иметь вид

$$U_4 = 2 K U_0 (\Delta \varphi_c + \delta_1 \varphi_c), \quad (13)$$

$$\delta_1 \varphi_c = \frac{A U_4}{\eta}, \quad (14)$$

где

где A — крутизна преобразования электрического напряжения в фазовый сдвиг;

η - коэффициент ослабления выходного напряжения;

K - коэффициент усиления выходного напряжения приемника оптического излучения.

После подстановки выражения (14) в (13) и введения упрощающего записи обозначения $U_5 = 2U_0$ получают

$$U_4 = \frac{K U_5 \Delta \varphi_5}{1 - \frac{1}{\eta} K A U_5}. \quad (15)$$

Следует учесть, что выходное электрическое напряжение U_4 пропорционально фазовому сдвигу Саньяка, которое, в свою очередь, зависит от частоты оптического излучения.

Изменяют значение дополнительного воздействия, изменяя частоту оптического излучения, и измеряют шестое значение электрического напряжения

$$U_6 = K U_5 (\Delta \varphi_c + \delta_2 \varphi_c), \quad (16)$$

$$\delta_2 \varphi_c = A \eta U_6.$$

где

После преобразования выражение (16) принимает вид

$$U_6 = \frac{K U_5 \Delta \varphi_c}{1 - K \eta A U_5}. \quad (17)$$

С помощью значения параметра k из ряда действительных чисел выражение (17) и (15) преобразуют с целью получения одинакового электрического напряжения после измерения с разными дополнительными воздействиями

$$U_7 = U_4 k, \quad (18)$$

$$U_7 = \frac{U_6}{k}. \quad (19)$$

Приравнивают выражения (18) и (19)

$$U_4 k = \frac{U_6}{k}. \quad (20)$$

$$\frac{K U_5 \Delta \varphi_c}{1 - \frac{1}{\eta} K A U_5} k = \frac{K U_5 \Delta \varphi_c}{(1 - K \eta A U_5) k},$$

$$k^2 (1 - K \eta A U_5) = 1 - \frac{1}{\eta} K A U_5,$$

$$k^2 - 1 = k^2 K \eta A U_5 - \frac{1}{\eta} K A U_5,$$

$$K = \frac{k^2 - 1}{A U_5 (k^2 \eta - \frac{1}{\eta})}. \quad (21)$$

Подставляют выражения (15) и (21) в (18) и после преобразования получают

$$\begin{aligned}
U_7 &= \frac{(k^2 - 1)}{A U_5 (k^2 \eta - \frac{1}{\eta})} \times \\
&\times \frac{U_5 \Delta \varphi_c k}{1 - \frac{1}{\eta} \frac{(k^2 - 1) A U_5}{A U_5 (k^2 \eta - \frac{1}{\eta})}}, \\
U_7 &= \frac{\eta (k^2 - 1) U_5 \Delta \varphi_c k}{\eta A U_5 (k^5 \eta - \frac{1}{\eta}) - (k^2 - 1) A U_5}, \\
\Delta \varphi_c &= \frac{U_7 A [\eta (k^5 \eta - \frac{1}{\eta}) - (k^2 - 1)]}{\eta (k^2 - 1) k}, \\
\Delta \varphi_c &= \frac{U_7 A (k^2 \eta^2 - k^2)}{\eta (k^2 - 1) k}, \\
\Delta \varphi_c &= \frac{U_7 A k (\eta^2 - 1)}{\eta (k^2 - 1)}. \quad (22)
\end{aligned}$$

Угловую скорость вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси определяют из выражения

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta \varphi_c \lambda c}{8 \pi N a}, \quad (23)$$

где λ - длина волны оптического излучения, распространяющегося в волоконно-оптической катушке;

N - количество витков в катушке;

a - площадь одного витка;

c - скорость света.

Подставив значение $\Delta \varphi_c$ из выражения (22) в (23), получают

$$\dot{\theta} = \left[\frac{U_7 A k (\eta^2 - 1)}{\eta (k^2 - 1)} \right] \frac{\lambda c}{8 \pi N a}. \quad (24)$$

Чувствительность волоконно-оптического гироскопа определяют из выражения (18)

$$\frac{d U_7}{d \Delta \varphi_c} = \frac{K U_5 k}{1 - \frac{1}{\eta} K A U_5}. \quad (25)$$

Из уравнений (25) и (17) следует, что

$$\frac{1}{\eta} K A U_5 \neq 1, \quad (26)$$

$$K \eta A U_5 \neq 1. \quad (27)$$

Очевидно, что чувствительность в предлагаемом техническом решении выше, чем в прототипе.

На чертеже представлена схема устройства для измерения угловой скорости.

Устройство содержит оптически сопряженные источник 1 оптического излучения и расщепитель 2 оптического излучения, волоконно-оптическую катушку 3, оптически сопряженную своими первым выходом-входом с расщепителем оптического излучения по его первой оптической оси, частотный модулятор 4, оптически сопряженный своим входом с выходом расщепителя 2 оптического излучения по его второй оптической оси, а выходом - со вторым выходом-входом волоконно-оптической катушки 3. приемник 5 оптического излучения, оптически сопряженный с расщепителем 2 оптического излучения по его первой оптической оси, дифференциальный усилитель 6, первый и второй входы которого соединены соответственно с первым и вторым выходами приемника 5 оптического излучения, аналого-цифровой преобразователь 7, аналоговый вход которого соединен с выходом дифференциального усилителя 6, блок 8 вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси, первый оперативный ввод-вывод которого соединен с выходом аналогоцифрового преобразователя 7, цифроаналоговый преобразователь 9, вход которого соединен со вторым оперативным вводом-выводом блока 8 вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси, а аналоговый выход - с третьим входом дифференциального усилителя 6, цифрууправляемый генератор 10, соединенный своим входом с третьим оперативным вводом-выводом блока 8, а своим выходом с электрическим входом частотного модулятора 4, дисплей 11, соединенный своим входом с четвертым оперативным вводом-выводом блока 8.

Устройство работает следующим образом.

Оптическое излучение от источника 1 поступает через расщепитель 2 оптического излучения по первой его оптической оси на первый выход-вход волоконно-оптической катушки 3, а по его второй оптической оси на электрооптический частотный модулятор 4. После электрооптического частотного модулятора излучение поступает на второй выход-вход волоконно-оптической катушки 3. После прохождения во встречных направлениях в волоконно-оптической катушке излучения интерферируют на приемнике 5 оптического излучения. Первое и второе

электрические напряжения с приемника оптического излучения поступают на первый вход дифференциального усилителя 6. Усиленное разностное электрическое напряжение с выхода дифференциального усилителя через аналого-цифровой преобразователь 7 поступает по первому оперативному вводу-выводу 7 в блок 8 вычисления угловой скорости вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси. С блока 8 по второму оперативному вводу-выводу управляющее электрическое напряжение поступает через цифроаналоговый преобразователь 9 на второй вход дифференциального усилителя, а по третьему оперативному вводу-выводу через цифро-управляемый генератор 10 на электрооптический частотный модулятор 4. Значение угловой скорости выводится на дисплей 10 через четвертый оперативный ввод-вывод блока 8. Алгоритм функционирования блока 8 предполагает следующий режим работы.

В режиме измерения с блока 8 выдается первое дополнительное управляющее воздействие на генератор 10 с целью выдачи частоты на электрооптический частотный модулятор 4 в сторону увеличения угловой скорости. Пропорционально выходного напряжения (13) получают дополнительный сдвиг фаз (14). Измеренное электрическое напряжение (15) вводится в оперативную память блока 8. С блока 8 выдается второе дополнительное управляющее воздействие на генератор 10 с целью выдачи частоты на электрооптический частотный модулятор 4 в сторону увеличения угловой скорости. Пропорционально выходного напряжения (16) получают дополнительный сдвиг фаз $\delta_2 \varphi_c$.

Измеренное электрическое напряжение (17) вводится в оперативную память блока 8. Так как первое дополнительное воздействие меньше второго, то в процессоре блока 8 выполняют операции (18) и (19). Блок 8 через цифроаналоговый преобразователь 9 выдает регулирующее воздействие на дифференциальный усилитель 6 в соответствии с вычисленным в микропроцессоре значением его коэффициента усиления K по формуле (21). По формуле (22) в микропроцессоре вычисляют фазовый сдвиг Саньяка и заносят в оперативную память блока 8. С учетом содержания оперативной памяти и записанных в ПЗУ значений λ , N , a , с в микропроцессоре вычисляется угловая скорость вращения волоконно-оптической катушки вокруг ее продольной оси по выражению (24) и выводится на дисплей 11. В макетном устройстве в качестве источника оптического излучения использован гелий-неоновый лазер ЛГН-302, генерирующий на длине волны 0,63 мкм. Оптический приемник излучения - фотодиод ФД-19КК. В качестве вычислительного устройства использовано устройство на основе микроконтроллера типа "Нейрон". Частотный модулятор - электрооптический. Цифроуправляемый генератор применен производства РИП МПСС России. Угловая скорость определена в диапазоне изменения интенсивности интерференционной полосы от минимума к максимуму (0-180°).

Полученная чувствительность составила $5 \cdot 10^{-4}$ град/час.

