

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2470477

### СПОСОБ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет" (ГОУ "СПбГПУ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011119371

Приоритет изобретения **13 мая 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 декабря 2012 г.**

Срок действия патента истекает **13 мая 2031 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*







**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011119371/28, 13.05.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
13.05.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 13.05.2011

(45) Опубликовано: 20.12.2012 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2408996 C2, 10.01.2011. RU 2099892 C1,  
20.12.1997. SU 1053321 A1, 07.11.1983. US  
6556509 B1, 29.04.2003.

Адрес для переписки:

195251, Санкт-Петербург, ул.  
Политехническая, 29, ГОУ ВПО "Санкт-  
Петербургский Государственный  
политехнический университет" (ГОУ  
"СПбГПУ"), отдел интеллектуальной и  
промышленной собственности

(72) Автор(ы):

**Лиокумович Леонид Борисович (RU),  
Медведев Андрей Викторович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального  
образования "Санкт-Петербургский  
Государственный политехнический  
университет" (ГОУ "СПбГПУ") (RU)**

**(54) СПОСОБ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптических способов измерения физических величин с использованием волоконных интерферометров. Предложены два варианта способа демодуляции сигнала волоконного интерферометра, включающие модуляцию разности фаз в интерферометре гармоническим сигналом, преобразование полученного сигнала в последовательность цифровых отсчетов и вычисление разности фаз. Согласно первому варианту способа преобразование сигнала осуществляют с частотой в три раза больше частоты модуляции разности фаз в

интерферометре и формируют тройки отсчетов из всех трех отсчетов каждого периода, после чего производят вычисление искомой разности фаз по каждой тройке. Согласно второму варианту способа тройки формируют из трех соседних отсчетов со сдвигом каждой последующей тройки на один отсчет. Технический результат - упрощение вычислений и реализации, исключение требования к определенному значению амплитуды вспомогательной модуляции и равенства разностей длин плеч интерферометров, объединенных в линию. 2 н. и 1 з.п. ф-лы.



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H04L 27/22* (2006.01)  
*G01J 9/02* (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2011119371/28, 13.05.2011**

(24) Effective date for property rights:  
**13.05.2011**

Priority:

(22) Date of filing: **13.05.2011**

(45) Date of publication: **20.12.2012 Bull. 35**

Mail address:

**195251, Sankt-Peterburg, ul. Politekhnikeskaja,  
29, GOU VPO "Sankt-Peterburgskij  
Gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet"  
(GOU "SPbGPU"), otdel intellektual'noj i  
promyshlennoj sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Liokumovich Leonid Borisovich (RU),  
Medvedev Andrej Viktorovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie  
vysshego professional'nogo obrazovanija "Sankt-  
Peterburgskij Gosudarstvennyj politekhnicheskij  
universitet" (GOU "SPbGPU") (RU)**

(54) **METHOD OF ALL-FIBER INTERFEROMETER SIGNAL DEMODULATION**

(57) Abstract:

FIELD: physics, communication.

SUBSTANCE: invention relates to optical measurements of physical magnitudes by means of all-fiber interferometers. Two proposed method comprise modulation of phase difference in interferometer by harmonic signal, converting obtained signal in sequence of digital counts, and computing phase difference. In compliance with first version, signal is converted at frequency three times

higher than that of phase difference modulation in interferometer to form triple of counts from all three counts of all periods. Thereafter, unknown phase difference for every triple is computed. In compliance with second version, triples are formed from three adjacent counts with shifting every next triple by one count.

EFFECT: simplified computation and implementation.

3 cl

RU 2 470 477 C1

RU 2 470 477 C1

Изобретение относится к области оптических способов измерения физических величин с использованием волоконных интерферометров, в том числе для измерения механических и акустических колебаний, а также линий сбора данных на их основе.

5 Известно «Опросное устройство для волоконно-оптических линий с использованием двух склонов» [Патент US №6778720]. Способ демодуляции сигнала, используемый в данном устройстве, включает вспомогательную модуляцию разности фаз световых волн в интерферометрах гармоническим сигналом, преобразование выходного сигнала фотоприемника, установленного на выходе линии, в  
10 последовательность цифровых отсчетов, выбор по пять отсчетов на каждом из двух склонов периодической зависимости сигнала от времени, вычисление по части выбранных отсчетов искомой разности фаз световых волн в интерферометре, вычисление амплитуды вспомогательной модуляции по остальным отсчетам и ее последующую регулировку. Недостатками данного способа являются сложность его  
15 реализации, использование в каждом цикле вычислений не менее десяти отсчетов сигнала, необходимость точного поддержания амплитуды вспомогательной модуляции и одинаковости разности плеч всех интерферометров, входящих в линию.

Известен «Четырехступенчатый дискретный способ демодуляции фазовых сдвигов для линий из волоконно-оптических датчиков» [Патент US №6122057]. Способ  
20 включает вспомогательную фазовую модуляцию интерферометра гармоническим сигналом, формирование четырех сигналов, являющихся интегралами выходного сигнала фотоприемника в течение разных промежутков времени, преобразование интегральных сигналов в последовательности цифровых отсчетов, вычисление  
25 искомой разности фаз световых волн в интерферометре. Недостатками данного способа являются сложность его реализации, необходимость формирования четырех интегральных сигналов, дополнительного вычисления поправочного коэффициента для корректировки вычисленных значений разности фаз.

Известен «Способ и устройство демодуляции выходных сигналов интерферометра повышенной точности», выбранный за прототип [Патент US №6556509]. Способ демодуляции включает модуляцию разности фаз световых волн в интерферометре по гармоническому закону с амплитудой, преобразование периодического сигнала, получаемого с фотоприемника, установленного на выходе интерферометра, (период  
35 сигнала равен периоду вспомогательной модуляции) в поток цифровых отсчетов с получением двенадцати отсчетов в течение каждого периода. Отсчеты регистрируются через равные промежутки времени, частота дискретизации в двенадцать раз выше частоты модуляции. Выбор в течение каждого периода сигнала шести отсчетов из  
40 двенадцати и вычисление по этим шести отсчетам значения искомой разности фаз один раз за период с использованием формул, полученных для амплитуды модуляции. После чего осуществляют вычисление по оставшимся шести отсчетам амплитуды модуляции, проверка равенства амплитуды значению радиан и корректировка амплитуды.

45 Недостатками прототипа являются сложность расчетов, сложность реализации способа, необходимость точного поддержания амплитуды вспомогательной гармонической модуляции равной  $\pi$  радиан, требование равенства разностей плеч всех интерферометров при использовании способа для демодуляции сигналов в линии из  
50 нескольких интерферометров.

Задачами способа демодуляции являются упрощение вычислений и реализации, исключение требования к определенному значению амплитуды вспомогательной модуляции и равенства разностей длин плеч интерферометров, объединенных в линию.

Для решения поставленной задачи предложено два варианта способа демодуляции сигнала волоконного интерферометра.

Первый вариант способа демодуляции включает модуляцию разности фаз в интерферометре гармоническим сигналом, преобразование сигнала осуществляют с частотой в три раза больше частоты модуляции разности фаз в интерферометре, формируют тройки отсчетов из всех трех отсчетов каждого периода, после чего вычисление искомой разности фаз ведут по каждой тройке по формулам:

$$\begin{cases} \varphi_c = \arctg\left[\frac{a}{b}\right], \text{ при } b > 0; \\ \varphi_c = \arctg\left[\frac{a}{b}\right] + \pi \cdot \text{sign}(a), \text{ при } b < 0. \end{cases}$$

где

$$a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1), \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1),$$

где  $u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}$  - значения отсчетов в тройке,  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ ,

$$\text{где } \varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0], \quad \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1], \quad \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2],$$

где  $\delta\varphi_m$  - амплитуда модулирующего сигнала,  $\theta_0$  - фазовая задержка первого отсчета относительно начала периода модуляции,  $\theta_1 = \theta_0 + 2\pi/3$ ,  $\theta_2 = \theta_0 + 4\pi/3$ . Тройки отсчетов могут быть сформированы из всех трех отсчетов одного периода с пропуском  $M-1$  периодов, где  $M$  - целое число  $> 1$ .

Второй вариант способа демодуляции сигнала волоконного интерферометра включает модуляцию разности фаз в интерферометре гармоническим сигналом, преобразование сигнала осуществляют с частотой в три раза больше частоты модуляции разности фаз в интерферометре, формируют тройки отсчетов, объединяющие каждые три соседних отсчета со сдвигом на один отсчет, затем вычисление искомой разности фаз ведут по каждой тройке по формулам:

$$\begin{cases} \varphi_c = \arctg\left[\frac{a}{b}\right], \text{ при } b > 0; \\ \varphi_c = \arctg\left[\frac{a}{b}\right] + \pi \cdot \text{sign}(a), \text{ при } b < 0. \end{cases}$$

где

$$a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1), \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1),$$

где  $u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}$  - значения отсчетов в тройке,  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ ,

где для первой тройки -  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ , для второй тройки  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ , для третьей тройки  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,

где  $\delta\varphi_m$  - амплитуда модулирующего сигнала,  $\theta_0$  - фазовая задержка первого отсчета относительно начала периода модуляции,  $\theta_1 = \theta_0 + 2\pi/3$ ,  $\theta_2 = \theta_0 + 4\pi/3$ , после чего процесс вычисления фаз повторяют.

Выбор частоты преобразования обусловлен необходимым минимальным количеством отсчетов в течение каждого периода модуляции.

В том случае, когда частота изменения искомой разности фаз мала, целесообразно формировать тройки отсчетов из всех трех отсчетов одного периода с пропуском  $M-1$  периодов, что позволит уменьшить среднее количество данных, обрабатываемых в

единицу времени, в  $M$  раз, где  $M$  - целое число  $>1$ .

В том случае, когда частота изменения искомой разности фаз велика, целесообразно формировать тройки отсчетов, объединяющие каждые три соседних отсчета со сдвигом на один отсчет, и использовать разные наборы коэффициентов, чтобы избежать искажения сигнала.

В предлагаемом способе частота преобразования полученного периодического сигнала в последовательность цифровых отсчетов и вычисление каждого значения искомой разности фаз по тройке отсчетов позволяет уменьшить количество данных и упростить расчеты.

Математические формулы, используемые для вычисления искомой разности фаз применимы при произвольной амплитуде модуляции, что упрощает реализацию и снимает требование одинаковой разности плеч всех интерферометров в линии.

Для модуляции разности фаз в интерферометре используем гармонический сигнал

$$\varphi(t) = \delta\varphi_m \sin[2\pi f_m t], \quad (1)$$

где  $\delta\varphi_m$  и  $f_m$  - амплитуда и частота модулирующего сигнала.

Известно, что напряжение, получаемое с фотоприемника, установленного на выходе двухплечного волоконного интерферометра, при наличии модуляции  $\varphi(t)$  имеет вид

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \cos[\varphi_C + \varphi(t)], \quad (2)$$

где  $\varphi_C$  - искомая разность фаз, которую необходимо определить в результате демодуляции,  $U_0$  и  $U_m$  - постоянная составляющая и амплитуда интерференционного сигнала.

Предполагается медленное изменение  $\varphi_C$ ,  $U_0$  и  $U_m$  по сравнению с колебаниями модулирующего сигнала, и в течение одного периода модуляции эти величины можно считать постоянными. Данное условие может быть формально выражено следующими неравенствами:

$$f_m / f_C \gg 1, (d\varphi_C / dt) \ll 2\pi f_m. \quad (3)$$

Преобразуем полученный сигнал (2) в последовательность отсчетов  $u_n$  с частотой дискретизации  $f_d$ , в три раза превышающей частоту модуляции  $f_d = 3 \cdot f_m$ ,

$$u_n = u(t_n) = U_0 + U_m \cos[\varphi_C + \varphi_n] = U_0 + U_m \cos[\varphi_C + \delta\varphi_m \sin\{(2\pi \cdot n/3) + \theta_0\}], \quad (4)$$

где  $n$  - номер отсчета от начала первого периода модуляции ( $n=0, 1, 2, \dots$ ),  $\theta_0 = 2\pi f_m \Delta t$  - фазовая задержка первого отсчета относительно начала периода модуляции,  $t_n$  - момент времени  $n$ -го отсчета интерференционного сигнала,  $\varphi_n$  - значения модулирующего сигнала  $\varphi(t)$  в моменты времени  $t_n$ .

Для описания формируемых сигналов удобно ввести в рассмотрение значения аргумента модулирующего фазу гармонического колебания (1) в моменты регистрации отсчетов  $t_n$

$$\theta_n = 2\pi n / 3 + \theta_0. \quad (5)$$

Для вычисления значения искомой разности фаз  $\varphi_C$  выбираем три отсчета интерференционного сигнала. Это условие определяется тем, что функция (2), описывающая модулированный интерференционный сигнал, имеет три неизвестных параметра, которые исходя из условия (3) полагаются постоянными в течение периода модуляции: искомая разность фаз  $\varphi_C$ ,  $U_0$  и  $U_m$ .

Обозначив тройку отсчетов сигнала в течение одного периода модуляции  $\{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\}$  и записав их значения по формуле (4), получим систему уравнений, решение которой приводит к выражениям для искомой разности фаз  $\varphi_C$  в диапазоне  $[-\pi, \pi]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_C = \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{b} \right], \text{ при } b > 0; \\ \varphi_C = \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{b} \right] + \pi \cdot \operatorname{sign}(a), \text{ при } b < 0, \end{array} \right. \quad (6)$$

где

$$a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1), \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1),$$

где  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ ,

$$\text{где } \varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0], \quad \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1], \quad \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2].$$

Тройки отсчетов могут быть сформированы из всех трех отсчетов одного периода, с пропуском  $M-1$  периодов, где  $M$  - целое число  $> 1$ .

Второй вариант способа демодуляции аналогичен первому, но тройки  $\{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\}$  формируют из трех соседних отсчетов со сдвигом в каждой последующей тройке на один отсчет.

Формула (6), по которой проводят вычисления значений искомой разности фаз  $\varphi_C$ , не меняются, но при вычислениях используют три варианта коэффициентов, соответствующих трем разным наборам  $\{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\}$ :

$$\text{для первой тройки } \{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\} = \{\delta\varphi_m \sin[\theta_0], \delta\varphi_m \sin[\theta_1], \delta\varphi_m \sin[\theta_2]\},$$

$$\text{для второй тройки } \{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\} = \{\delta\varphi_m \sin[\theta_1], \delta\varphi_m \sin[\theta_2], \delta\varphi_m \sin[\theta_0]\},$$

$$\text{для третьей тройки } \{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\} = \{\delta\varphi_m \sin[\theta_2], \delta\varphi_m \sin[\theta_0], \delta\varphi_m \sin[\theta_1]\}.$$

Каждому из этих трех наборов  $\{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\}$  соответствует свой набор коэффициентов  $\{C_0, C_1, C_2, S_0, S_1, S_2\}$ , вычисляемый по тем же формулам:  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ .

После третьей тройки наборы  $\{\varphi^{(0)}, \varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\}$  и процесс вычисления разности фаз повторяют для 4-й, 5-й и 6-й троек и т.д.

Для реализации способа демодуляции необходимо регистрировать колебания  $\varphi_C(t)$ , вызываемые воздействием на интерферометр в частотном диапазоне, не превышающем полосу 5 кГц и амплитудой не более 1 радиана (например, акустические или вибрационные воздействия).

По первому варианту способа модулируем разность фаз в интерферометре гармоническим сигналом с частотой  $f_M = 50$  кГц и амплитудой  $\delta\varphi_m = 2$  радиана. При этом для максимальной частоты и амплитуды измеряемого сигнала  $F_C = 5$  кГц неравенства условия (3) принимают вид

$$f_M/F_C = 10 \gg 1 \text{ и } (d\varphi_C/dt) = 2\pi \cdot 1 \cdot 5 = 10\pi \ll 2\pi f_M = 100\pi,$$

т.е. условия выполняются.

Преобразование полученного периодического сигнала в последовательность цифровых отсчетов производим с частотой  $f_d = 3f_M = 150$  кГц, т.е. в три раза больше, чем частота модуляции. При этом допустим, что сдвиг начального отсчета относительно начала периода соответствует фазовому сдвигу  $\theta_0 = 0.2$  радиан (т.е.  $\Delta t = 0.637$  мкс).

Пусть в течение некоторого периода модуляции параметры интерференционного сигнала имеют значения  $U_0 = 1$ ,  $U_m = 1$ , а искомая фаза составляет  $\varphi_C = 2$  радиана. Тогда, согласно (4) для этого периода будет сформирована тройка отсчетов

$$\{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\} = \{0.264, 0.063, 1.995\}$$

Для вычисления искомой разности фаз используем фиксированные коэффициенты:  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0] = 0.397$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1] = 1.499$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2] = -1.896$  радиан;

$$C_0 = \cos[\varphi^{(0)}] = 0.922, C_1 = \cos[\varphi^{(1)}] = 0.072, C_2 = \cos[\varphi^{(2)}] = -0.32;$$

$$S_0 = \sin[\varphi^{(0)}] = 0.387, S_1 = \sin[\varphi^{(1)}] = 0.997, S_2 = \sin[\varphi^{(2)}] = -0.948.$$

В результате расчета по формуле (6) для указанной тройки получим:

$$5 \quad a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1) = 0.264(0.072 + 0.32) + 0.063(-0.32 - 0.922) + 1.995(0.922 - 0.072) = 1.721;$$

$$b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1) = 0.264(0.997 + 0.948) + 0.063(-0.948 - 0.387) + 1.995(0.387 - 0.997) = -0.788;$$

$$10 \quad a/b = -2.185; \arctg(a/b) = -1.42;$$

$$\varphi_C = \arctg(a/b) + \pi = 2 \text{ радиана.}$$

Таким образом, получили правильное значение искомой разности фаз  $\varphi_C$ .

Данный пример иллюстрирует вычисление искомой разности фаз  $\varphi_C$  и в случае формирования троек из отсчетов каждого периода, и в случае формирования троек из  
15 всех отсчетов одного периода с пропуском  $M-1$  периодов, где  $M$  - целое число  $>1$ , например при  $M=2$  пропускаем каждый второй период.

Во втором варианте способа все действия выполняем аналогично первому, но формируем тройки отсчетов, объединяющие каждые три соседних отсчета со сдвигом  
20 на один отсчет. Например, пусть в течение некоторых двух периодов модуляции параметры интерференционного сигнала имеют значения  $U_0=1, U_m=1$ , а искомая фаза составляет  $\varphi_C=2$  радиана. Тогда, согласно (4) для этих двух периодов будут зафиксированы следующие значения отсчетов

$$0.264; 0.063; 1.995; 0.264; 0.063; 1.995.$$

25 По этому набору отсчетов будут сформированы четыре тройки отсчетов:

$$\text{первая } \{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\} = \{0.264, 0.063, 1.995\}$$

$$\text{вторая } \{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\} = \{0.063, 1.995, 0.264\}$$

$$\text{третья } \{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\} = \{1.995, 0.264, 0.063\}$$

$$30 \quad \text{четвертая } \{u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}\} = \{0.264, 0.063, 1.995\}$$

При вычислении искомой разности фаз используем три набора фиксированных коэффициентов. Для первой (4-й, 7-й и т.д.) тройки:

$$\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0] = 0.397, \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1] = 1.499, \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2] = -1.896 \text{ радиан;}$$

$$35 \quad C_0 = \cos[\varphi^{(0)}] = 0.922, C_1 = \cos[\varphi^{(1)}] = 0.072, C_2 = \cos[\varphi^{(2)}] = -0.32;$$

$$S_0 = \sin[\varphi^{(0)}] = 0.387, S_1 = \sin[\varphi^{(1)}] = 0.997, S_2 = \sin[\varphi^{(2)}] = -0.948.$$

Для второй (5-й, 8-й и т.д.) тройки:

$$\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1] = 1.499, \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2] = -1.896, \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0] = 0.397 \text{ радиан;}$$

$$40 \quad C_0 = \cos[\varphi^{(0)}] = 0.072, C_1 = \cos[\varphi^{(1)}] = -0.32, C_2 = \cos[\varphi^{(2)}] = 0.922;$$

$$S_0 = \sin[\varphi^{(0)}] = 0.997, S_1 = \sin[\varphi^{(1)}] = -0.948, S_2 = \sin[\varphi^{(2)}] = 0.387.$$

Для третьей (6-й, 9-й и т.д.) тройки:

$$\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1] = 1.499, \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2] = 0.397, \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0] = -1.896 \text{ радиан;}$$

$$45 \quad C_0 = \cos[\varphi^{(0)}] = -0.32, C_1 = \cos[\varphi^{(1)}] = 0.922, C_2 = \cos[\varphi^{(2)}] = 0.072;$$

$$S_0 = \sin[\varphi^{(0)}] = -0.948, S_1 = \sin[\varphi^{(1)}] = 0.387, S_2 = \sin[\varphi^{(2)}] = 0.997.$$

Расчет коэффициентов  $a$  и  $b$  по формулам

$$50 \quad a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1); \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1);$$

для каждой тройки даст следующие результаты.

Для первой тройки:

$$a = 0.264(0.072 + 0.32) + 0.063(-0.32 - 0.922) + 1.995(0.922 - 0.072) = 1.721;$$

$$b = 0.264(0.997 + 0.948) + 0.063(-0.948 - 0.387) + 1.995(0.387 - 0.997) = -0.788;$$



Для второй тройки:

$$a=0.063(-0.32-0.922)+1.995(0.922-0.072)+0.264(0.072+0.32)=1.721;$$

$$b=0.063(-0.948-0.387)+1.995(0.387-0.997)+0.264(0.997+0.948)=-0.788;$$

Для третьей тройки:

$$a=1.995(0.922-0.072)+0.264(0.072+0.32)+0.063(-0.32-0.922)=1.721;$$

$$b=1.995(0.387-0.997)+0.264(0.997+0.948)+0.063(-0.948-0.387)=-0.788;$$

Для четвертой тройки:

$$a=0.264(0.072+0.32)+0.063(-0.32-0.922)+1.995(0.922-0.072)=1.721;$$

$$b=0.264(0.997+0.948)+0.063(-0.948-0.387)+1.995(0.387-0.997)=-0.788;$$

Соответственно по всем тройкам согласно (6) получим одинаковые значения искомой разности  $\varphi_C = \arctg(a/b) + \pi = 2$  радиана, т.е. правильное значение искомой фазы.

Пример реализации 2-х вариантов способа демодуляции сигнала волоконного интерферометра демонстрирует упрощение вычисления искомой разности фаз. При вычислении не требуется определенное значение амплитуды вспомогательной модуляции и равенство разностей длин плеч интерферометров, объединенных в линию.

### Формула изобретения

1. Способ демодуляции сигнала волоконного интерферометра, включающий модуляцию разности фаз в интерферометре гармоническим сигналом, преобразование полученного периодического сигнала в последовательность цифровых отсчетов, вычисление искомой разности фаз, отличающийся тем, что преобразование сигнала осуществляют с частотой в три раза больше частоты модуляции разности фаз в интерферометре, формируют тройки отсчетов из всех трех отсчетов каждого периода, после чего вычисление искомой разности фаз ведут по каждой тройке по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_C = \arctg \left[ \frac{a}{b} \right], \text{ при } b > 0; \\ \varphi_C = \arctg \left[ \frac{a}{b} \right] + \pi \cdot \text{sign}(a), \text{ при } b < 0, \end{array} \right.$$

где

$$a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1), \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1),$$

где  $u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}$  - значения отсчетов в тройке,  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ ,

$$\text{где } \varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0], \quad \varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1], \quad \varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2],$$

где  $\delta\varphi_m$  - амплитуда модулирующего сигнала,  $\theta_0$  - фазовая задержка первого отсчета относительно начала периода модуляции,  $\theta_1 = \theta_0 + 2\pi/3$ ,  $\theta_2 = \theta_0 + 4\pi/3$ .

2. Способ по п.1 отличающийся тем, что формируют тройки отсчетов из всех трех отсчетов одного периода, с пропуском  $M-1$  периодов, где  $M$  - целое число  $> 1$ .

3. Способ демодуляции сигнала волоконного интерферометра, включающий модуляцию разности фаз в интерферометре гармоническим сигналом, преобразование полученного периодического сигнала в последовательность цифровых отсчетов, вычисление искомой разности фаз, отличающийся тем, что преобразование сигнала осуществляют с частотой в три раза больше частоты модуляции разности фаз в интерферометре, формируют тройки отсчетов, объединяющие каждые три соседних отсчета со сдвигом на один отсчет, затем вычисление искомой разности фаз ведут по каждой тройке по формулам:

$$5 \quad \begin{cases} \varphi_c = \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{b} \right], \text{ при } b > 0; \\ \varphi_c = \operatorname{arctg} \left[ \frac{a}{b} \right] + \pi \cdot \operatorname{sign}(a), \text{ при } b < 0, \end{cases}$$

где

$$a = u^{(0)}(C_1 - C_2) + u^{(1)}(C_2 - C_0) + u^{(2)}(C_0 - C_1), \quad b = u^{(0)}(S_1 - S_2) + u^{(1)}(S_2 - S_0) + u^{(2)}(S_0 - S_1),$$

10 где  $u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}$  - значения отсчетов в тройке,  $C_0 = \cos[\varphi^{(0)}]$ ,  $C_1 = \cos[\varphi^{(1)}]$ ,  $C_2 = \cos[\varphi^{(2)}]$  и  $S_0 = \sin[\varphi^{(0)}]$ ,  $S_1 = \sin[\varphi^{(1)}]$ ,  $S_2 = \sin[\varphi^{(2)}]$ ,

где для первой тройки -  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ , для второй тройки  $\varphi^{(0)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ , для третьей тройки  $\varphi^{(0)} =$   
 15  $\delta\varphi_m \sin[\theta_2]$ ,  $\varphi^{(1)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_0]$ ,  $\varphi^{(2)} = \delta\varphi_m \sin[\theta_1]$ ,

где  $\delta\varphi_m$  - амплитуда модулирующего сигнала,  $\theta_0$  - фазовая задержка первого отсчета относительно начала периода модуляции,  $\theta_1 = \theta_0 + 2\pi/3$ ,  $\theta_2 = \theta_0 + 4\pi/3$ , после чего процесс вычисления фаз повторяют.

20

25

30

35

40

45

50