

УДК 681.787+004.942

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАЗОВОГО СДВИГА СИГНАЛА ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА НА ВЫХОДНОЙ СИГНАЛ СХЕМЫ ГОМОДИННОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

А.В. Волков^а, Е.С. Осколкова^а, М.Ю. Плотников^а, М.В. Мехреньгин^а, Ф.А. Шуклин^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: hi-teching@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.04.15, принята к печати 02.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-608-614

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Волков А.В., Осколкова Е.С., Плотников М.Ю., Мехреньгин М.В., Шуклин Ф.А. Исследование влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора на выходной сигнал схемы гомодинной демодуляции сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 608–614.

Аннотация

Предмет исследования. Важной особенностью схемы гомодинной демодуляции сигналов на основе вычисления значений функции арктангенса является фазовый сдвиг сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала. Это явление обусловлено наличием задержек распространения импульсов в оптической схеме интерферометрического датчика и аналогового фильтра низких частот перед фазовым модулятором, что вносит фазовую задержку в сигнал опорного генератора. В рассматриваемой схеме гомодинной демодуляции происходит перемножение сигналов опорного генератора и интерференционного сигнала в процессе его обработки, а фазовый сдвиг между этими сигналами приводит к искажению выходного сигнала. В предлагаемой работе представлены результаты исследования влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора на выходной сигнал рассматриваемой схемы демодуляции при различных параметрах интерференционного сигнала. Дается оценка требуемой точности компенсации фазового сдвига для обеспечения заданного уровня искажений выходного сигнала. **Метод.** Предложена математическая модель в среде MATLAB. В этой модели интерференционный сигнал с изменяющимися по заданным правилам параметрами пропускается через рассматриваемую схему демодуляции. Это позволяет получить зависимости амплитуды выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора, положения рабочей точки интерферометра, глубины фазовой модуляции и амплитуды измеряемого фазового сигнала. Полученные в ходе моделирования результаты показали необходимость компенсации фазового сдвига сигнала опорного генератора. Для оценки этого сдвига в действующей схеме гомодинной демодуляции предложена оригинальная методика его определения. Методика основана на пропускании интерференционного сигнала и сигнала опорного генератора через один и тот же полосовой фильтр, выделяющий несущую частоту фазовой модуляции. По фазовой задержке между получившимися сигналами можно судить о значении фазового сдвига сигнала опорного генератора. Зная значение фазового сдвига сигнала опорного генератора, можно этот сдвиг скорректировать. Коррекция достигается внесением в сигнал опорного генератора требуемой задержки. **Основные результаты.** Результаты математического моделирования показали существенную нелинейную зависимость выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора при различных значениях глубины фазовой модуляции, положениях рабочей точки интерферометра и амплитудах измеряемого фазового сигнала. Обнаружено, что оптимальные значения фазового сдвига сигнала опорного генератора 0, 180° и 360°, обеспечивают отсутствие искажений в выходном сигнале. Показано, что для обеспечения уровня искажений в выходном сигнале рассматриваемой схемы демодуляции около 4% требуется компенсация фазового сдвига с точностью до 3% относительно периода сигнала опорного генератора. **Практическая значимость.** Предложена оригинальная методика, позволяющая оценивать значение фазового сдвига сигнала опорного генератора. Компенсация найденного фазового сдвига в ходе практической реализации рассматриваемой схемы гомодинной демодуляции обеспечивает корректность работы схемы и увеличивает соотношение сигнал/шум выходного сигнала.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, методы гомодинной демодуляции, опорный генератор, фазовый сдвиг, измеряемый фазовый сигнал.

PHASE SHIFT INFLUENCE RESEARCH OF THE REFERENCE OSCILLATOR SIGNAL ON THE OUTPUT SIGNAL IN HOMODYNE DEMODULATION SCHEME

A.V. Volkov^a, E.S. Oskolkova^a, M.Yu. Plotnikov^a, M.V. Mekhreggin^a, P.A. Shuklin^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: hi-teching@yandex.ru

Article info

Received 08.04.15, accepted 02.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-4-608-614

Article in Russian

For citation: Volkov A.V., Oskolkova E.S., Plotnikov M.Yu., Mekhreggin M.V., Shuklin P.A. Phase shift influence research of the reference oscillator signal on the output signal in homodyne demodulation scheme. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 608–614.

Abstract

Subject of Research. Important feature of homodyne demodulation method based on the arctangent function approach is the phase shift between the reference oscillator signal and the interference signal. This phenomenon is caused by propagation delays of impulses in the optical interferometric sensor scheme and the analog low-pass filter in front of the phase modulator which produces the reference oscillator signal phase delay. There is multiplying of the reference oscillator signal and the interference signal in this homodyne demodulation scheme during its processing, and the phase shift between these signals leads to a distortion of the output signal. This paper deals with the findings of the phase shift influence of the reference oscillator signal by the output signal of the demodulation scheme at various parameters of the interference signal. Estimation of required accuracy is given of the phase shift compensation for the specified level distortion of the output signal. **Method.** Mathematical model is proposed in MATLAB. In this model, interference signal with changing parameters by a set of rules is passed through the considered demodulation scheme. This gives the possibility to obtain the dependences of the output signal amplitude from the reference oscillator signal phase shift, the operating point of the interferometer, the depth of phase modulation and amplitude of the measured phase signal. Results obtained during the simulation showed the need to compensate the reference oscillator signal phase shift. To assess this shift in the current homodyne demodulation scheme the original method of its determination has been proposed. The method is based on the transmission of the interference signal and the oscillator signal via one and the same band-pass filter that separates the phase modulation carrier frequency. According to the phase delay between the receiving signals, the value of the reference oscillator signal phase shift can be judged on. This shift can be corrected with knowledge of the value of the reference oscillator signal phase shift. Correction is achieved by making the required delay in reference oscillator signal. **Main Results.** The results of mathematical modeling show significant nonlinear dependences of the output signal on the reference oscillator signal phase shift at different values of the phase modulation depth, the operating point of the interferometer and the measured phase signal amplitude. It was found out that optimal values of the reference oscillator signal phase shift equal to 0, 180° and 360° provide minimum distortions of the output signal. It was shown that to achieve about 4% distortion level of the output signal phase shift compensation with an accuracy of 3% relative to period of the reference oscillator signal was required. **Practical Significance.** The original method making it possible to assess the value of the reference oscillator signal phase shift has been proposed. The reference oscillator signal phase shift compensation during considered homodyne demodulation scheme practical implementation provides the correctness of the scheme operation and increases the signal to noise ratio of the output signal.

Keywords

fiber optic sensor, homodyne demodulation methods, reference oscillator, phase shift, measured phase signal.

Введение

Алгоритмы гомодинной демодуляции изначально создавались для обработки интерференционных сигналов в волоконно-оптических интерферометрических датчиков гидроакустического давления [1–3]. На данный момент существуют два основных метода гомодинной демодуляции – на основе перекрестного перемножения [4–9] и на основе вычисления значений функции арктангенса [10].

В ходе практической реализации схем гомодинной демодуляции необходимо учитывать некоторые особенности их построения, такие как выбор полосы пропускания фильтров низких частот [11], выбор оптимальной глубины фазовой модуляции [12], а также фазовый сдвиг сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала [13]. Как было показано в работе [13], нежелательный фазовый сдвиг сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала может привести к некорректному определению амплитуды измеряемого фазового сигнала в схеме гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения.

Схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса, которая была разработана для устранения влияния мощности оптического излучения на выходной сигнал [10], также подвержена значительному влиянию этого эффекта, поскольку в ней используется ряд аналогичных математических преобразований над интерференционным сигналом.

Использование схемы гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса значительно снижает требования к постоянству бюджета оптической мощности интерферометрических волоконно-оптических датчиков и обеспечивает большую повторяемость их характеристик, поэтому исследование влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала в этой схеме демодуляции представляется весьма актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена моделированию и анализу влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала на выходной сигнал схемы гомодинной демодуляции на основе вычисления значения функции арктангенса в зависимости от различных параметров интерференционного сигнала.

Математическая модель схемы демодуляции

На рис. 1 представлена принципиальная схема одиночного волоконно-оптического интерферометрического датчика на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [14, 15] со схемой гомодинной демодуляции сигналов на основе вычисления значений функций арктангенса.

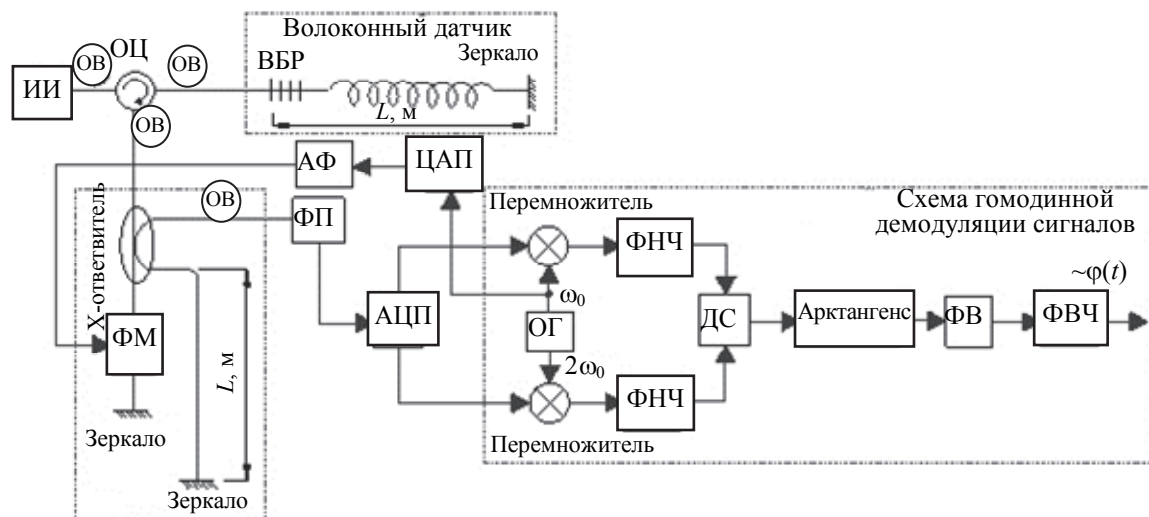


Рис. 1. Принципиальная схема одиночного волоконно-оптического интерферометрического датчика на основе волоконных брэгговских решеток со схемой гомодинной демодуляции сигналов на основе вычисления значений функций арктангенса

На рис. 1 обозначены: ИИ – источник излучения; ОЦ – оптический циркулятор; ОВ – оптическое волокно; КИ – компенсационный интерферометр; ФМ – фазовый модулятор; ФП – фотоприемник; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АФ – аналоговый фильтр низких частот; ОГ – опорный генератор; ω_0 – циклическая частота опорного генератора; $2\omega_0$ – удвоенная циклическая частота опорного генератора; ФНЧ – фильтр низких частот; ДС – делитель сигналов; ФВ – фазовращатель; ФВЧ – фильтр высоких частот; $\varphi(t)$ – измеряемый фазовый сигнал.

Схема, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Оптический импульс от ИИ проходит через ОЦ и попадает на волоконный датчик. Импульс частично отражается от ВБР и далее отражается от зеркала датчика, отраженные импульсы через ОЦ попадают в КИ. В КИ каждый импульс делится в Х-ответвителе на два: первый проходит по короткому плечу интерферометра через ФМ, а второй – по длинному плечу интерферометра, после чего импульсы отражаются от зеркал и распространяются в обратном направлении. На входе ФП импульсы с короткого и длинного плеч КИ интерферируют друг с другом. Полученный сигнал попадает на ФП, где оптический интерференционный сигнал преобразуется в электрический сигнал и подается на вход АЦП. Получившийся после аналого-цифрового преобразования сигнал поступает на вход схемы гомодинной демодуляции сигналов.

Далее, как показано на рис. 1, сигнал опорного генератора перемножается с оцифрованным интерференционным сигналом и одновременно подается на фазовый модулятор через ЦАП и АФ. Из-за необходимости использования сглаживающего АФ для сигнала опорного генератора и наличия задержек распространения оптических импульсов в оптической схеме интерферометрического датчика возникает задержка по фазе между сигналом опорного генератора и интерференционным сигналом – фазовый сдвиг сигнала опорного генератора.

Для исследования влияния фазового сдвига сигнала опорного генератора на выходной сигнал была построена математическая модель рассматриваемого алгоритма демодуляции в программной среде MATLAB [16, 17]. Интерференционный сигнал на входе рассматриваемой схемы демодуляции может быть представлен как

$$I_{\text{вх}}(t) = A + B \cos \left[C \cos(2\pi f_0 t + \varphi_{\text{ген}}) + D \cos(2\pi f t) + \varphi_0 \right], \quad (1)$$

где A и B – постоянные, пропорциональные мощности оптического излучения приходящего на фотоприемник, для данной модели приняты 0 и 32766 (соответствует разрядной сетке 16-битного АЦП); C – зна-

чение глубины фазовой модуляции: в ходе моделирования оно изменялось в диапазоне от 0 до 2π радиан с шагом 0,1 радиан; f_0 – частота сигнала опорного генератора, равная 25 кГц; D – амплитуда измеряемого фазового сигнала: в ходе моделирования амплитуда изменялась в диапазоне от 0 до 6 рад с шагом 0,1 рад, а f – частота, равная 500 Гц; φ_0 – положение рабочей точки интерферометра: в модели оно изменялось в диапазоне от 0 до 2π рад с шагом 0,1 рад; φ_{gen} – значение фазового сигнала сдвига опорного генератора, изменялось в диапазоне от 0 до 360° с шагом 6° . Длительность моделируемых сигналов составляла 1 с, полоса пропускания фильтров низких частот (ФНЧ) 6 кГц, частота дискретизации интерференционного сигнала была равна 100 кГц.

Результаты моделирования

В ходе моделирования были получены согласно выражению (1) следующие зависимости:

- амплитуды выходного сигнала от положения рабочей точки интерферометра и фазового сдвига сигнала опорного генератора;
- амплитуды выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала и фазового сдвига сигнала опорного генератора при нулевом положении рабочей точки интерферометра;
- амплитуды выходного сигнала от глубины фазовой модуляции и фазового сдвига сигнала опорного генератора при нулевом положении рабочей точки интерферометра.

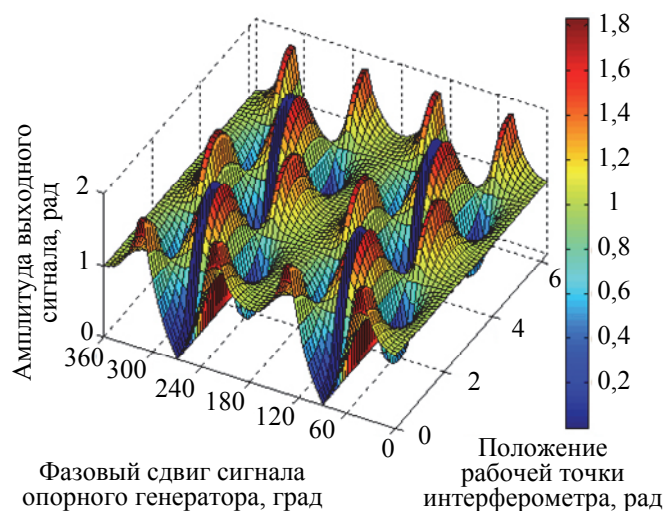


Рис. 2. Зависимость амплитуды выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора и положения рабочей точки интерферометра

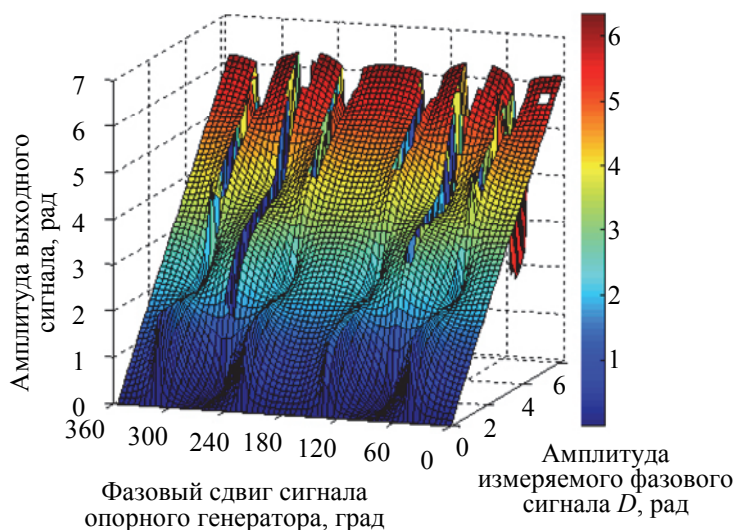


Рис. 3. Зависимость амплитуды выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора и амплитуды измеряемого фазового сигнала D

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды выходного сигнала от положения рабочей точки интерферометра и фазового сдвига сигнала опорного генератора. Согласно полученной зависимости, при

наличии значительного (более 12°) фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значения функции арктангенса утрачивает свойство независимости амплитуды выходного сигнала от положения рабочей точки интерферометра. На практике это проявляется в биениях амплитуды выходного сигнала схемы демодуляции вследствие воздействия на интерферометр температурных градиентов, вибраций или давления, т.е. воздействий, приводящих к уходу рабочей точки интерферометра. Другими словами, выходной сигнал рассматриваемого алгоритма демодуляции становится нестабильным во времени, а при отдельных значениях фазового сдвига сигнала опорного генератора (90° и 270°) вообще не будет содержать сигнальных гармоник на частоте измеряемого фазового сигнала.

На рис. 3 представлена зависимость выходного сигнала от амплитуды измеряемого фазового сигнала и фазового сдвига сигнала опорного генератора при нулевом положении рабочей точки интерферометра. Приведенный на рис. 3 график демонстрирует амплитудные характеристики рассматриваемой схемы демодуляции при различных значениях фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала при нулевом положении рабочей точки интерферометра. Согласно приведенным данным, при наличии фазового сдвига сигнала опорного генератора наблюдается нелинейность амплитудной характеристики рассматриваемой схемы гомодинной демодуляции. С практической точки зрения это означает, что амплитуда выходного сигнала при наличии существенного фазового сдвига сигнала опорного генератора не будет пропорциональна амплитуде измеряемого фазового сигнала, что, в свою очередь, приведет к некорректному определению амплитуды исходного воздействия на волоконно-оптический датчик.

На рис. 4 представлена зависимость амплитуды выходного сигнала от глубины фазовой модуляции и фазового сдвига сигнала опорного генератора при нулевом положении рабочей точки интерферометра. Исходя из результатов, представленных на рис. 4, можно утверждать, что наличие фазового сдвига сигнала опорного генератора может привести к некорректной оценке амплитуды измеряемого фазового сигнала.

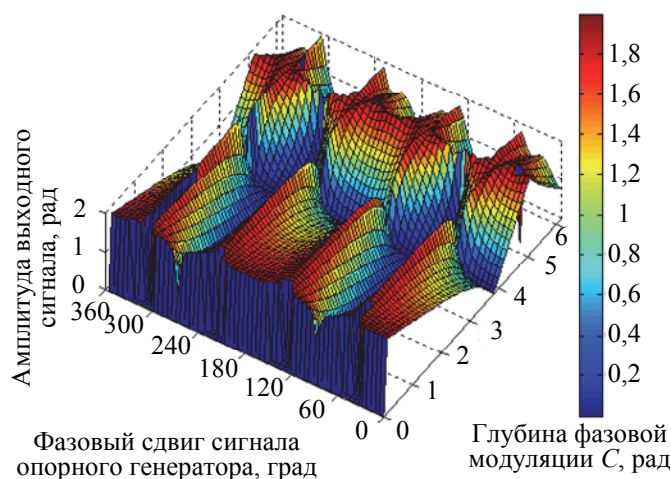


Рис. 4. Зависимость амплитуды выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора и глубины фазовой модуляции C

Исходя из результатов моделирования, представленных на рис. 2–4, можно утверждать, что выходной сигнал схемы гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса существенно зависит от наличия фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала. Таким образом, в ходе реализации рассматриваемого алгоритма демодуляции необходимо определять, учитывать и корректировать этот фазовый сдвиг.

Согласно данным, представленным на рис. 2–4, для корректной работы рассматриваемого алгоритма демодуляции необходимо обеспечение отклонения фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно его оптимальных значений (0 , 180° и 360°) не более чем на 3% (12°) относительно периода сигнала опорного генератора, что обеспечивает ошибку амплитуды выходного сигнала относительно амплитуды измеряемого фазового сигнала не более чем 4% .

Методика определения фазового сдвига сигнала опорного генератора

Определение точного значения фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала может быть осуществлено путем фильтрации интерференционного сигнала и сигнала с опорного генератора полосовым фильтром, как это показано на рис. 5. Согласно рис. 5, сигнал с опорного генератора и интерференционный сигнал после АЦП проходят через один и тот же полосовой фильтр (ПФ), пропускающий частоту сигнала опорного генератора f_0 . В результате в интерференцион-

ном сигнале остается несущая частота, равная частоте сигнала опорного генератора. Пропускание сигнала с опорного генератора через такой же ПФ необходимо для внесения одинаковой фазовой задержки в оба сигнала.

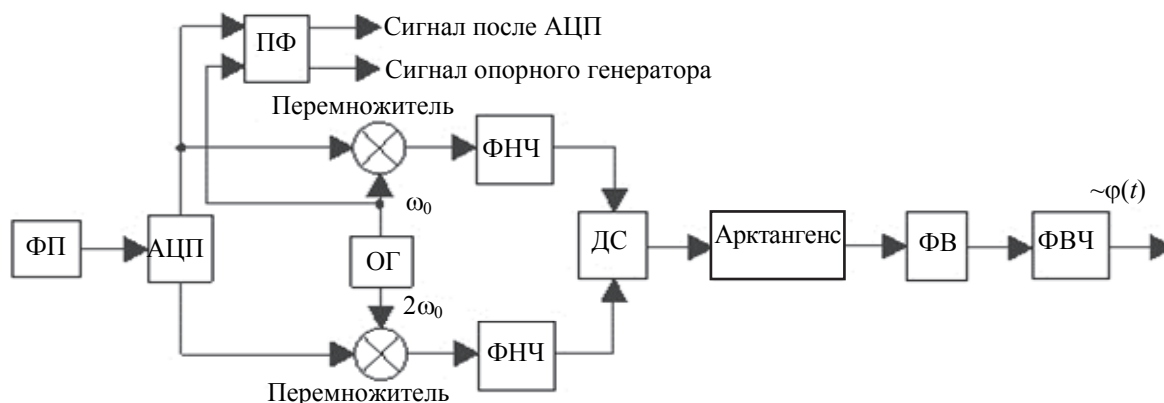


Рис. 5. Принципиальная схема методики определения значения фазового сдвига сигнала опорного генератора

Имея несущую составляющую интерференционного сигнала после ПФ и сигнал опорного генератора, можно наложить их друг на друга в ходе дальнейшей обработки и найти временную задержку между ними, которая и будет соответствовать искомому значению фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала. Зная текущее значение фазового сдвига сигнала опорного генератора, можно скорректировать его, внося в сигнал опорного генератора требуемую задержку.

Заключение

В работе получены и проанализированы зависимости амплитуды выходного сигнала от фазового сдвига сигнала опорного генератора и положения рабочей точки интерферометра, амплитуды измеряемого фазового сигнала и глубины фазовой модуляции для алгоритма гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса. В ходе математического моделирования было показано, что наличие существенного фазового сдвига сигнала опорного генератора относительно интерференционного сигнала приводит к некорректной работе рассматриваемого алгоритма. Для обеспечения выходного сигнала рассматриваемой схемы демодуляции с уровнем искажений по амплитуде не более 4% требуется компенсация фазового сдвига с точностью до 3% (с точностью до 12°) относительно периода сигнала опорного генератора.

В результате работы предложена методика определения истинного значения фазового сдвига сигнала опорного генератора, которая может быть использована при практической реализации алгоритма демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса.

Литература

1. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
2. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
3. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. Fiber Optic Sensors. 2nd ed. CRC Press, 2008. 492 p.
4. Feng L., He J., Duan J.-Y., Li F., Liu Y.-L. Implementation of phase generated carrier technique for FBG laser sensor multiplexed system based on compact RIO // Proc. 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, APOS 2008. Chengdu, China, 2008. Art. 5226295. doi: 10.1109/APOS.2008.5226295
5. Dandridge A., Tveten A.B., Gialloronzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier // IEEE J Quantum Electron. 1982. V. QE-18. N 10. P. 1647–1653.
6. Варжель С.В., Стригалева В.Е. Метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 5 (69). С. 5–8.
7. Li Y., Liu Z., Liu Y., Ma L., Tan Z., Jian S. Interferometric vibration sensor using phase-generated carrier method // Applied Optics. 2013. V. 52. N 25. P. 6359–6363. doi: 10.1364/AO.52.006359
8. He C., Hang L., Wu B. Application of homodyne demodulation system in fiber optic sensors using phase generated carrier based on LabVIEW in pipeline leakage detection // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6150. Art. 61502G. doi: 10.1117/12.676892

9. Li Y., Huang J., Gu H., Li R., Tan B., Chen L. All-digital real time demodulation system of fiber laser hydrophone using PGC method // Proc. 3rd Int. Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA 2011). Shanghai, China, 2011. V. 1. P. 359–362. doi: 10.1109/ICMTMA.2011.91
10. Wang L., Zhang M., Mao X., Liao Y. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6292. Art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
11. Плотников М.Ю., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование зависимости амплитуды выходного сигнала в схеме гомодинной демодуляции для фазового волоконно-оптического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 18–22.
12. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovsky I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // Advances in Optical Technologies. 2014. V. 2014. Art. 815108. doi:10.1155/2014/815108
13. Huang S.-C., Lin H. Modified phase-generated carrier demodulation compensated for the propagation delay of the fiber // Applied Optics. 2007. V. 46. N 31. P. 7594–7603. doi: 10.1364/AO.46.007594
14. Артеев В.А., Варжель С.В., Куликов А.В. Распределенный волоконно-оптический датчик акустического давления на брэгговских решетках // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб., 2011. С. 509–510.
15. Плотников М.Ю., Варжель С.В., Коннов К.А., Грибаев А.И., Куликов А.В., Артеев В.А. Применение решеток Брэгга при создании современных волоконно-оптических сенсорных систем // Сборник трудов I Международной научно-практической конференции «Sensorica-2013». Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2013. Вып. I. С. 76–77.
16. Плотников М.Ю., Волков А.В., Осколкова Е.С. Моделирование и исследование алгоритмов демодуляции сигналов волоконно-оптических интерферометрических датчиков // Сборник тезисов III Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб.: Университет ИТМО, 2014. С. 364–365.
17. Плотников М.Ю., Волков А.В., Осколкова Е.С. Исследование алгоритмов демодуляции интерференционных сигналов // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica-2014». СПб.: Университет ИТМО, 2014. С. 99–100.

Волков Антон Валерьевич	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, hi-teching@yandex.ru
Осколкова Евгения Сергеевна	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, oskolkova20@gmail.com
Плотников Михаил Юрьевич	– кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plotnikov-michael@yandex.ru
Мехреньгин Михаил Викторович	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mehrengin@gmail.com
Шуклин Филипп Александрович	– ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, shuklin.philipp@gmail.com
Anton V. Volkov	– Research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, hi-teching@yandex.ru
Evgeniya S. Oskolkova	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, oskolkova20@gmail.com
Mikhail Yu. Plotnikov	– PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plotnikov-michael@yandex.ru
Mikhail V. Mekhrengin	– Research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mehrengin@gmail.com
Philipp A. Shuklin	– Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, shuklin.philipp@gmail.com