



УДК 681.787

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГОМОДИННОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ФАЗОВОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

М.Н. Беликин^а, М.Ю. Плотников^а, В.Е. Стригалева^а, А.В. Куликов^а, А.Ю. Киреевков^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: mbelikin@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.05.15, принята к печати 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалева В.Е., Куликов А.В., Киреевков А.Ю. Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1008–1014.

Аннотация

Предмет исследования. Приведены результаты сравнительного экспериментального анализа алгоритмов гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения и на основе вычисления значений функции арктангенса в одинаковых условиях. Исследованы зависимости параметров выходных сигналов рассматриваемых алгоритмов демодуляции от интенсивности оптического излучения. **Метод.** Для проведения экспериментального сравнения алгоритмов демодуляции сигналов использован макет одиночного волоконно-оптического фазового интерферометрического датчика. **Основные результаты.** Установлено, что алгоритм гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса обеспечивает в среднем на 7 дБ большее отношение сигнал/шум выходных сигналов в полосе частот акустического воздействия от 100 до 500 Гц по сравнению с алгоритмом гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения. Показано, что для исследованного диапазона значений амплитуд оптических импульсов, поступающих на вход фотоприемного устройства, амплитуда выходных сигналов обработки не меняется. Полученные результаты свидетельствуют о том, что алгоритм гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса является предпочтительным для использования в фазовых волоконно-оптических датчиках и обеспечивает большую повторяемость их характеристик в отличие от алгоритма гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения. **Практическая значимость.** Алгоритмы гомодинной демодуляции интерференционных сигналов широко используются в фазовых волоконно-оптических датчиках, улучшение их характеристик положительно сказывается на эффективности работы таких датчиков.

Ключевые слова

волоконно-оптический датчик, схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения, схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса.

EXPERIMENTAL COMPARISON OF HOMODYNE DEMODULATION ALGORITHMS FOR PHASE FIBER-OPTIC SENSOR

M.N. Belikin^a, M.Yu. Plotnikov^a, V.E. Strigaleva^a, A.V. Kulikov^a, A.Yu. Kireenkov^a^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: mbelikin@gmail.com

Article info

Received 15.05.15, accepted 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014

Article in Russian

For citation: Belikin M.N., Plotnikov M.Yu., Strigaleva V.E., Kulikov A.V., Kireenkov A.Yu. Experimental comparison of homodyne demodulation algorithms for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1008–1014.

Abstract

Subject of Research. The paper presents the results of experimental comparative analysis of homodyne demodulation algorithms based on differential cross multiplying method and on arctangent method under the same conditions. The dependencies of parameters for the output signals on the optical radiation intensity are studied for the considered demodulation algorithms. **Method.** The prototype of single fiber optic phase interferometric sensor has been used for experimental comparison of signal demodulation algorithms. **Main Results.** We have found that homodyne demodulation based on arctangent method provides greater (by 7 dB at average) signal-to-noise ratio of output signals over the frequency band of acoustic impact from 100 Hz to 500 Hz as compared to differential cross multiplying algorithms. We have demonstrated that no change in the output signal amplitude occurs for the studied range of values of the optical pulses

amplitudes. Obtained results indicate that the homodyne demodulation based on arctangent method is most suitable for application in the phase fiber-optic sensors. It provides higher repeatability of their characteristics than the differential cross multiplying algorithm. **Practical Significance.** Algorithms of interferometric signals demodulation are widely used in phase fiber-optic sensors. Improvement of their characteristics has a positive effect on the performance of such sensors.

Keywords

fiber-optic sensor, Phase Generated Carrier – Differential Cross Multiplying method, Phase Generated Carrier – Arctangent method.

Введение

Создание фазовых волоконно-оптических интерферометрических датчиков (ВО ФИД), использующих оптическое волокно в качестве чувствительного элемента, – актуальная проблема. ВО ФИД обладают высокой точностью и чувствительностью по сравнению с механическими и химическими датчиками, позволяют мультиплексировать массивы с большим количеством чувствительных элементов, обладают сравнительно небольшими габаритами и малой массой, что делает их незаменимыми в авиационном и космическом приборостроении. Отсутствие токоведущих частей в конструкции ВО ФИД обеспечивает высокую пожарную безопасность, а также высокую стойкость к вредным внешним воздействиям [1–3]. В большинстве современных ВО ФИД используются цифровые алгоритмы приема и обработки сигналов, позволяющие значительно расширить их функциональные возможности и увеличить производительность операций приема и обработки данных по сравнению с традиционными аналоговыми схемами обработки. Все чаще реализация алгоритма обработки ВО ФИД происходит с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [4, 5].

В статье рассматриваются схемы гомодинной демодуляции, которые получили наиболее широкое распространение благодаря большому динамическому диапазону [6], высокой линейности [7], а также возможности демодуляции сигналов, поступающих с большого количества датчиков в режиме реального времени [8, 9]. Существуют две основных разновидности алгоритмов гомодинной демодуляции – схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения (PGC – DCM, Phase Generated Carrier – Differential Cross Multiplying) и схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса (PGC – Atan, Phase Generated Carrier – Arctangent) [10]. Несмотря на значительное число исследований, посвященных анализу этих алгоритмов, в современной научной литературе не рассмотрена проблематика их экспериментального сравнения и выбора оптимального алгоритма демодуляции для фазовых волоконно-оптических датчиков. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального сравнения этих алгоритмов с точки зрения их применимости для обработки сигнала ВО ФИД.

Схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения

Алгоритм гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения был впервые предложен для обработки сигналов волоконно-оптических датчиков гидроакустического давления [10]. Он получил широкое распространение благодаря двум своим особенностям: алгоритм не требует использования петли обратной связи, а выходной сигнал схемы обработки не зависит от положения рабочей точки интерферометра [11]. Принципиальная схема алгоритма гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения представлена на рис. 1.

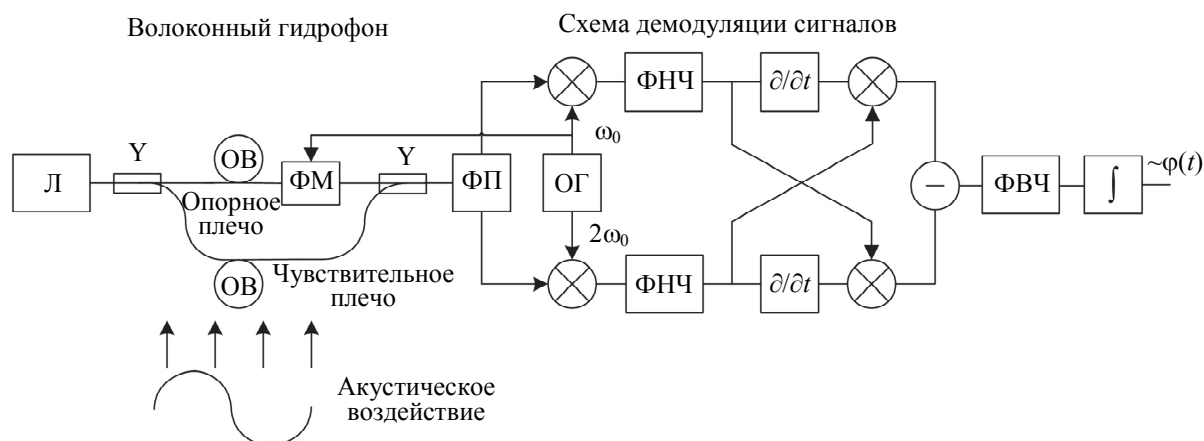


Рис. 1. Схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения: Л – лазерный источник излучения; Y – Y-разветвитель; ОВ – оптическое волокно; ФМ – фазовый модулятор; ФП – фотоприемник; ОГ – опорный генератор; ФНЧ – фильтр низких частот; $\partial/\partial t$ – операция дифференцирования; «-» – операция вычитания; ФВЧ – фильтр высоких частот; \int – интегратор; ω_0 – циклическая частота фазовой модуляции; $\varphi(t)$ – выходной сигнал.

В опорном плече интерферометра установлен фазовый модулятор, на который подается гармонический сигнал от опорного генератора схемы демодуляции. В результате интерференции на фотоприемник приходит оптический сигнал с интенсивностью

$$I(t) = A + B \cos[C \cos(\omega_0 t) + \varphi(t)], \quad (1)$$

где A и B – константы, определяемые интенсивностью светового излучения и видностью интерференционной картины на фотоприемнике; C – глубина фазовой модуляции (рад); ω_0 – циклическая частота фазовой модуляции [10–12]. При этом величина $\varphi(t)$ может быть определена как

$$\varphi(t) = D \cdot \cos(\omega t) + \varphi_0,$$

где D – амплитуда измеряемого фазового сигнала (рад); ω – циклическая частота измеряемого фазового сигнала, φ_0 – положение рабочей точки интерферометра, которое может изменяться под действием температуры или механического воздействия на интерферометр.

Выходной сигнал рассматриваемой схемы демодуляции определяется выражением

$$S(t) = B^2 J_1(C) J_2(C) D \cos \omega t, \quad (2)$$

где $J_1(C)$ и $J_2(C)$ – функции Бесселя первого и второго порядка от глубины фазовой модуляции C . В реальной схеме демодуляции в выражение (2) будут также входить множители, учитывающие усиление (или ослабление) сигналов на этапах выполнения математических преобразований.

Схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса

Суть метода гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса заключается в осуществлении ряда преобразований над сигналом с волоконного интерферометра. Схема метода представлена на рис. 2 [13, 14].

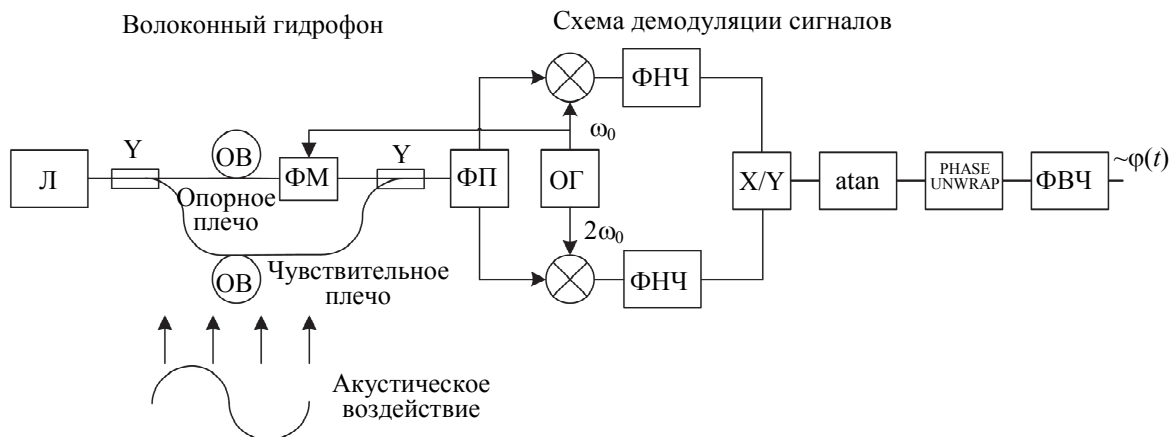


Рис. 2. Схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса: X/Y – операция деления; atan – операция вычисления значений функции арктангенса, PHASE UNWRAP – блок доворачивания фазы.

Приведенную на рис. 2 схему можно разделить на две части – волоконно-оптический интерферометр и схему демодуляции сигналов, которая, в свою очередь, может быть реализована как в аналоговой, так и в цифровой форме. В данной схеме демодуляции сигнал, приходящий с интерферометра на фотоприемник, определяется таким же образом, как и его аналог в схеме с перекрестным перемножением. Это объясняется одинаковым видом фазовой модуляции, используемой в алгоритмах.

Согласно рис. 2, над интерференционным сигналом выполняются операции перемножения на сигналы с опорного генератора, низкочастотной фильтрации и деления. Сигнал на выходе блока деления определяется как

$$S_{div}(t) = \frac{-BJ_1(C) \sin \varphi(t)}{-BJ_2(C) \sin \varphi(t)} = \frac{J_1(C)}{J_2(C)} \operatorname{tg} \varphi(t), \quad (3)$$

а сигнал после вычисления значения функции арктангенса от выражения (3) – как [15]

$$S_{atan}(t) = \operatorname{arctg} \left(\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \operatorname{tg} \varphi(t) \right) = \varphi(t). \quad (4)$$

Как видно из (4), выходной сигнал рассматриваемой схемы демодуляции не зависит от мощности оптического излучения, а зависит только от измеряемого фазового сигнала и глубины фазовой модуляции.

Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции

Для экспериментального сравнения алгоритмов демодуляции сигналов был использован макет одиночного ВО ФИД, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

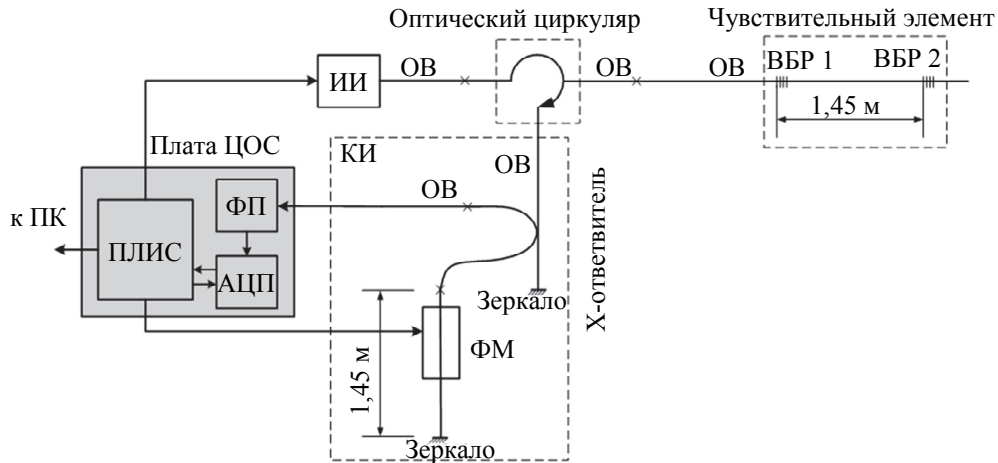


Рис. 3. Принципиальная схема макета одиночного ВО ФИД на волоконных брэгговских решетках (ВБР): ИИ – источник оптического излучения; ОВ – оптическое двулучепреломляющее волокно; ВБР1 и ВБР2 – волоконные брэгговские решетки; Х – ответвитель; КИ – компенсационный интерферометр; ФМ – фазовый модулятор; плата ЦОС – плата цифровой обработки сигналов; ФП – фотоприемник; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

Рассматриваемые алгоритмы демодуляции реализованы на ПЛИС XC3S 10005FPG256C семейства Spartan 3 фирмы Xilinx, а разработка схем демодуляции велась с использованием свободно распространяемой среды программирования Xilinx ISE 14.4 Web Edition.

Основные параметры реализуемых схем гомодинной демодуляции: частота опроса волоконно-оптического датчика – 125 кГц; частота фазовой модуляции – 12,5 кГц; полоса пропускания ФНЧ – 1500 Гц; полоса пропускания ФВЧ – от 25 Гц; частота дискретизации выходных сигналов со схемы демодуляции – 20 кГц.

Экспериментальное исследование рассматриваемых алгоритмов демодуляции сигналов производилось в два этапа:

- определение отношения сигнал/шум выходных сигналов схем демодуляции на различных частотах при неизменном расположении чувствительного элемента относительно источника акустического излучения;
- определение зависимостей отношения сигнал/шум выходных сигналов схем демодуляции и амплитуд выходных сигналов схем демодуляции от мощности оптического излучения (размаха оптических импульсов) при неизменном расположении чувствительного элемента относительно источника акустического излучения.

Результаты экспериментального сравнения алгоритмов гомодинной демодуляции

Полученные в ходе первого этапа измерений результаты отражают зависимость отношения сигнал/шум выходных сигналов рассматриваемых схем демодуляции на различных частотах акустического воздействия.

Сигнал со схемы демодуляции пропорционален амплитуде акустического воздействия на чувствительный элемент и выражается в единицах младшего разряда (ед.мл.разр.), т.е. характеризуется низким отношением сигнал/шум. В эксперименте не использовался опорный микрофон, т.е. невозможно было определять амплитуду измеряемого акустического давления в паскалях. Поэтому производилась сравнение относительных величин зарегистрированных сигналов (отношение сигнал/шум) рассматриваемых алгоритмов демодуляции, выраженных в децибелах. Амплитуды сигналов в децибелах были получены путем построения спектра зарегистрированных сигналов в единицах младшего разряда и нахождения амплитуд спектральных составляющих. При этом длительность, частота дискретизации записываемых сигналов и ширина полосы пропускания спектроанализатора не менялись в ходе проведения измерений. Расчет амплитуд сигналов в децибелах проводился по формуле

$$P_{\text{сиг}} \text{ (дБ)} = 20 \lg \frac{P_{\text{сиг}} \text{ (ед.мл.разр.)}}{P_0 \text{ (ед.мл.разр.)}}, \quad (5)$$

где $P_0 = 1$ (ед.мл.разр.). Отношение сигнал/шум при этом определялось в децибелах как разница между значением амплитуды спектральной составляющей на частоте измерений в децибелах и уровнем шума на частоте измеряемого сигнала, который регистрировался при отсутствии акустических сигналов. Уровень шума определялся путем фильтрации сигнала шума, записанного при отсутствии акустического воздействия на ФИД, узкополосным полосовым фильтром, далее определялось среднее квадратичное значение

шума после фильтрации в рассматриваемой полосе частот, полученное среднеквадратичное значение шума делилось на корень из полосы частот и пересчитывалось в децибелы согласно (5). Центральная частота полосового фильтра при этом изменялась в соответствии с частотой измеряемого сигнала.

Результаты измерений представлены на рис. 4.

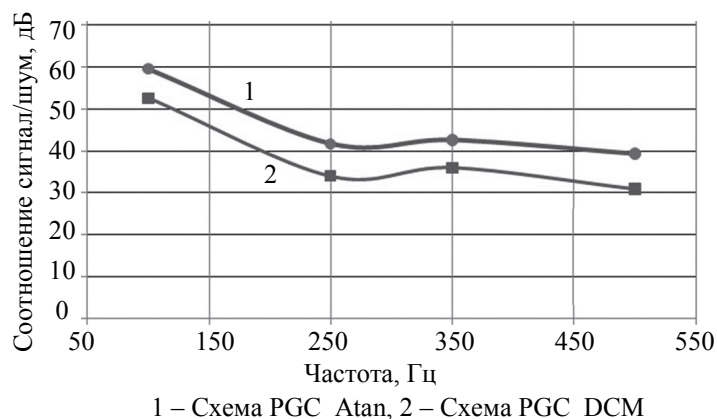


Рис. 4. Отношения сигнал/шум выходных сигналов исследуемых схем гомодинной демодуляции на разных частотах акустического излучения

Из рис. 4, видно, что схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса демонстрирует в среднем на 7 дБ большее отношение сигнал/шум, чем схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения, во всей рабочей полосе частот 100–500 Гц. Таким образом, схема гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса позволяет регистрировать более чем в два раза слабые акустические сигналы, чем схема гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения. Это позволяет снизить уровень минимально обнаружимого воздействия и увеличить динамический диапазон ВО ФИД.

В ходе второго этапа измерений регистрировались отношения сигнал/шум выходных сигналов схем демодуляции при различных значениях размаха интерференционного сигнала. Для этого с помощью звукового генератора осуществлялась подача на чувствительный элемент макета звукового излучения на частоте 250 Гц, при этом амплитуда оптических импульсов (размах интерференционного сигнала B в выражении (1)) на фотоприемнике устанавливалась в максимум путем регулировки силы тока, подаваемого на источник оптического излучения, и в ходе проведения измерений постепенно уменьшалась. Результаты измерений представлены на рис. 5, 6.

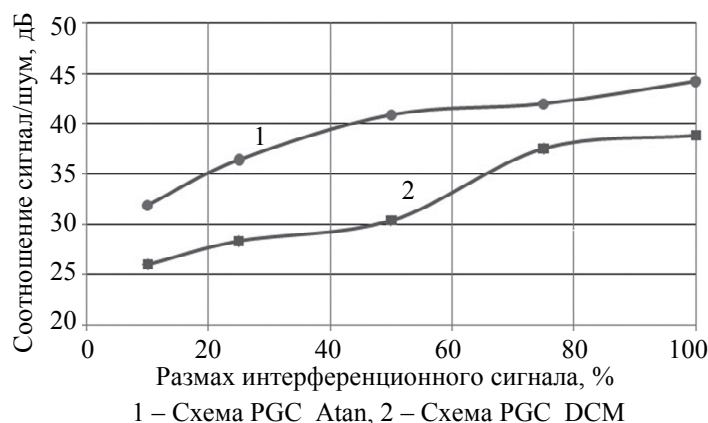


Рис. 5. Зависимость отношения сигнал/шум выходных сигналов исследуемых схем гомодинной демодуляции от размаха интерференционного сигнала, регистрируемого на фотоприемнике

При уменьшении размаха интерференционного сигнала ниже 10% от максимального значения мощности оптического излучения наблюдалось зашумление полезного сигнала, из-за которого определение его амплитуды не представлялось возможным.

Согласно рис. 5, отношение сигнал/шум выходных сигналов схемы гомодинной демодуляции на основе вычисления арктангенса в среднем на 7 дБ больше, чем отношение сигнал/шум выходных сигналов схемы гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения, при всех уровнях мощности оптического излучения на фотоприемнике. Согласно рис. 6, амплитуда выходных сигналов схемы гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса практически не зависит

от уровня мощности оптического излучения на фотоприемнике, в то время как амплитуда выходных сигналов со схемы гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения меняется по квадратичному закону.

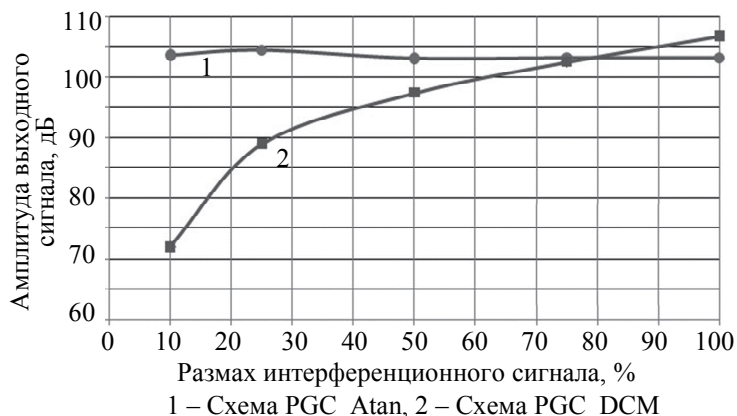


Рис. 6. Зависимость амплитуды выходных сигналов исследуемых схем демодуляции от размаха оптических импульсов на фотоприемнике (мощности оптического излучения)

Заключение

Полученные в ходе экспериментального исследования алгоритмов гомодинной демодуляции результаты позволяют сделать следующие выводы:

- амплитуда выходного сигнала в схеме гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса не зависит от мощности оптического излучения;
- амплитуда выходного сигнала в схеме гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения пропорциональна квадрату мощности оптического излучения;
- алгоритм гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса обеспечивает на 7 дБ большее отношение сигнал/шум для выходного сигнала, чем алгоритм гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения, во всей рабочей полосе частот и при различных уровнях мощности оптического излучения.

Таким образом, данные, полученные в ходе настоящего экспериментального исследования, согласуются с известными теоретическими зависимостями.

Экспериментальное сравнение рассматриваемых алгоритмов демодуляции показало, что алгоритм демодуляции сигналов на основе вычисления значений функции арктангенса является оптимальным для применения в ВО ФИД, поскольку:

- независимость амплитуды выходного сигнала схемы демодуляции на основе вычисления значения функции арктангенса от уровня мощности оптического излучения значительно снижает требования к сохранению неизменного оптического бюджета мощности в оптических схемах ВО ФИД и позволяет обеспечить большую повторяемость их характеристик;
- алгоритм гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса позволяет получать выходные сигналы с более высоким отношением сигнал/шум, чем алгоритм на основе перекрестного перемножения, что позволяет снизить уровень минимально обнаружимого воздействия и увеличить динамический диапазон ВО ФИД.

Литература

1. Shizhuo Y., Ruffin P.B., Francis T.S. Fiber Optic Sensors. 2nd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 492 p.
2. Sherman C.H., Butler J.L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. NY: Springer, 2007. 625 p. doi: 10.1007/978-0-387-33139-3
3. Liu L., Zhang H., Zhao Q., Liu Y., Li F. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity // Optical Fiber Technology. 2007. V. 13. N 1. P. 78–80. doi: 10.1016/j.yofte.2006.09.001
4. The Ocean Engineering Handbook / Ed. F. El-Hawary. Boca Raton: CRC Press, 2001. 416 p.
5. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
6. 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.

7. Wang Y., Wang C., Yuan Y., Liang L. Detection of low frequency signals using interferometric fiber sensors based on phase generated carrier demodulation technique // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2015. V. 8. N 2. P. 147–156. doi: 10.14257/ijsp.2015.8.2.15
8. 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.
9. 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 // Journal of Electronic Science and Technology of China. 2008. V. 6. N 4. P. 385–388.
10. Dandridge A., Tveten A.B., Gialloronzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1982. V. 18. N 10. P. 1647–1653. doi: 10.1109/JQE.1982.1071416
11. Tong Y., Zeng H., Li L., Zhou Y. Improved phase generated carrier demodulation algorithm for eliminating light intensity disturbance and phase modulation amplitude variation // Applied Optics. 2012. V. 51. N 29. P. 6962–6967. doi: 10.1364/AO.51.006962
12. Плотников М.Ю., Дейнека И.Г. Расширение функциональных возможностей схемы электронной обработки сигналов волоконно-оптического акустического датчика интерферометрического типа // Сборник трудов I Всероссийского конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2012. С. 54–58.
13. 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
14. Kirkendall C., Dandridge A. Overview of high performance fibre-optic sensing // Journal of Physics D: Applied Physics. 2004. V. 37. N 18. P. R197–R216. doi: 10.1088/0022-3727/37/18/R01
15. Плотников М.Ю., Дейнека И.Г. Разработка блока генерации гармонических сигналов для схемы цифровой обработки информации волоконно-оптического гидрофона // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 12. С. 68–71.

Беликин Михаил Николаевич	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mbelikin@gmail.com
Плотников Михаил Юрьевич	– кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, plotnikov-michael@yandex.ru
Стригалева Владимир Евгеньевич	– кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vstrglv@mail.ru
Куликов Андрей Владимирович	– кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, a.kulikov86@gmail.com
Киреев Александр Юрьевич	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexkir49@gmail.com
Mikhail N. Belikin	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mbelikin@gmail.com
Mikhail Yu. Plotnikov	– PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, plotnikov-michael@yandex.ru
Vladimir E. Strigalev	– PhD, Associate professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vstrglv@mail.ru
Andrey V. Kulikov	– PhD, Associate professor, Head of the laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, a.kulikov86@gmail.com
Alexander Yu. Kireenkov	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexkir49@gmail.com