

УДК 681.787

М.А. Земляникин, Ю.В. Раевская

ОБРАБОТКА СИГНАЛА, ПРИНИМАЕМОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ГИДРОФОНОМ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматриваются две схемы демодуляции сигнала, принимаемого волоконно-оптическим гидрофоном – схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и схема демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса. Приводятся результаты расчетов амплитудных характеристик схем демодуляции, производится их сравнение с экспериментальными характеристиками, а также делается сравнение двух схем демодуляции между собой, даются результаты работы схем демодуляции.

Ключевые слова: волоконно-оптический гидрофон, амплитудная характеристика, гомодинный метод демодуляции.

Введение

Особенностью водной среды является малая дальность распространения электромагнитных волн в ней. Это затрудняет создание приборов, применяющих беспроводную связь, подобных тем, которые используются на суше. Поэтому большинство телеизмерений в водной среде проводятся с помощью гидроакустических систем. Так, например, задача организации судоходства и осуществления связи военных и гражданских судов успешно решается с помощью гидролокации, разведки морских нефтегазоносных бассейнов, включая входящие в арктический шельф, а также осуществляется компактными и протяженными гидроакустическими системами, применяемыми в системах наблюдения акваторий портов и охраны морских границ.

На протяжении всего прошлого столетия гидроакустические измерения проводились с помощью приборов, использующих пьезокерамические чувствительные элементы [1]. В пьезоэлектрическом гидрофоне используется прямой пьезоэффект некоторых веществ (сегнетова соль, ниобат калия), при котором механические напряжения, приложенные к кристаллу, вызывают появление поверхностных электрических зарядов на его гранях. При переменном механическом напряжении возникает переменная электродвижущая сила на электродах-обкладках. Вещество, обладающее пьезоэлектрическими свойствами, не обязательно является монокристаллом, поэтому нашли широкое применение поликристаллические материалы, называемые пьезокерамикой (например, титанат бария, титанат-цирконат свинца). Чувствительные элементы пьезоэлектрических гидрофонов изготавливают в виде пакетов прямоугольной или цилиндрической формы. Однако такие чувствительные элементы обладают некоторыми существенными недостатками – они имеют большой вес и объем, и их достаточно сложно мультиплексировать.

Поэтому за несколько последних десятилетий количество гидроакустических систем, построенных на основе волоконно-оптических интерферометрических датчиков, увеличилось в разы. Причиной этой перемены является ряд преимуществ волоконно-оптических датчиков над пьезоэлектрическими [2, 3]:

- высокая чувствительность,
- устойчивость к электромагнитным помехам,
- электрическая пассивность,
- малые габариты,
- легкость мультиплексирования,
- низкая стоимость изготовления чувствительных элементов,
- приемники могут быть удалены на расстояние 5-10 км от блока сбора данных,
- по одному оптическому волокну можно передавать сигналы многих датчиков.

Несмотря на значительные успехи в области построения современных волоконно-оптических измерительных гидроакустических систем, все еще существует ряд проблем, которые не являются до конца решенными. Поэтому детального рассмотрения требуют вопросы проектирования волоконно-оптического гидроакустического датчика, а также его чувствительного элемента, организации сети волоконно-оптических гидрофонов, определения оптимальных способов демодуляции интерферометрических сигналов и алгоритмов последующей их обработки, которая обеспечивает достижение целей, поставленных перед разработчиком. В настоящей статье рассматриваются схемы демодуляции сигналов, принимаемых волоконно-оптическим гидрофоном и алгоритмы их последующей обработки.

Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения

Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения [4] представлена на рис. 1. Левая часть схемы представляет собой волоконно-оптический гидрофон, а правая – схему демодуляции сигналов.

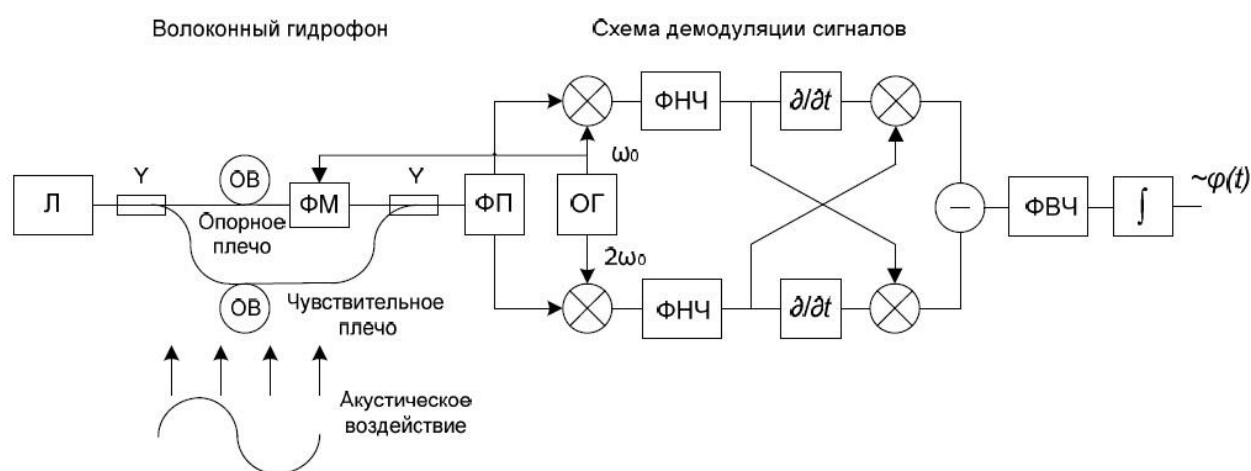


Рис. 1. Схема гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения:

Л – лазерный источник излучения; Υ – волоконный разветвитель; ОВ – оптическое волокно; ФМ – фазовый модулятор; ФП – фотоприемник; ОГ – опорный генератор; ФНЧ – фильтр низких частот; ФВЧ – фильтр высоких частот, используемый для исключения влияния механических воздействий, а также температуры; ∫ – интегратор

Выходной сигнал интерферометра, входящего в состав волоконно-оптического гидрофона, представляется синусоидальной функцией, аргументом которой является разность фаз между плечами интерферометра $\theta(t)$. В разности фаз содержится необходимая информация об измеряемом давлении. Ток фотоприемника на выходе интерферометра представляется формулой

$$i(t) = A \cos \theta(t) + B, \tag{1}$$

где A и B – параметры, относящиеся к интенсивности сигнала и чувствительности детектора.

Во многих схемах демодуляции используется также высокочастотное колебание частоты ω_0 , поэтому ток фотоприемника имеет вид

$$i(t) = A \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi(t)] + B, \tag{2}$$

где $C \cos \omega_0 t$ - несущий сигнал; C – индекс модуляции; $\varphi(t)$ включает себя не только интересующий нас сигнал, но и смещение рабочей точки интерферометра.

Ток i имеет значительное количество гармонических составляющих, возникающих из-за фазовой модуляции. Амплитуда n -й гармоники связана с функцией Бесселя n -го порядка с аргументом φ_m , используя это разложение, получим формулу:

$$i(t) = A \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos \varphi(t) - \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi(t) \right\} + B. \quad (3)$$

Например, амплитуда компоненты с частотой основного тона представляется формулой:

$$-2A J_1(C) \cos \omega_0 t \sin \varphi(t), \quad (4)$$

амплитуда второй гармоники:

$$-2A J_2(C) \cos 2\omega_0 t \cos \varphi(t). \quad (5)$$

Из этого выражения видно, что если $\varphi(t) = 0$, то только четные гармоники присутствуют в выходном сигнале (рис. 2), в то время как при $\varphi(t) = \pi/2$ останутся только нечетные гармоники (рис. 3).

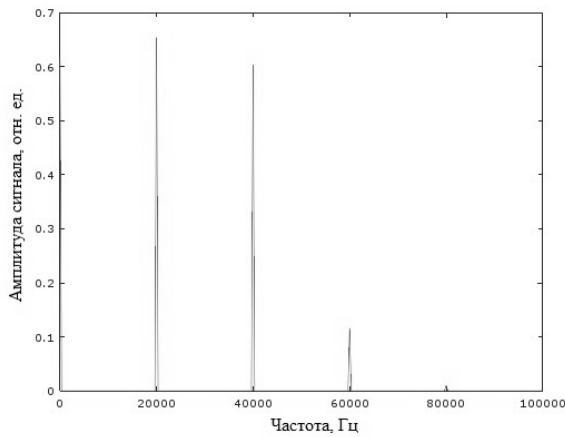


Рис. 2. Спектр выходного сигнала интерферометра при $\varphi(t) = 0$, $f_0 = 10$ кГц

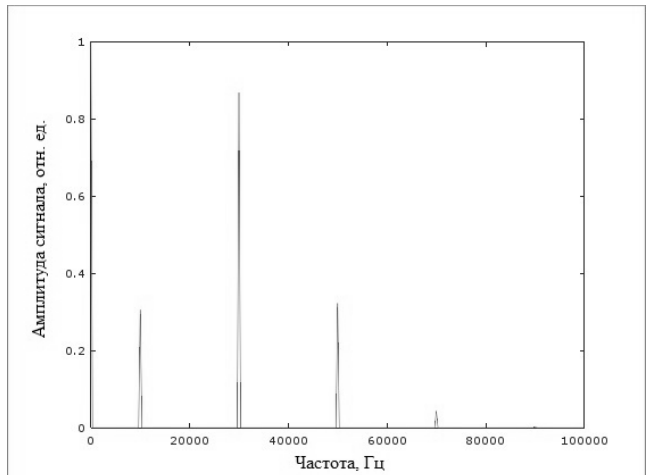


Рис. 3. Спектр выходного сигнала интерферометра при $\varphi(t) = \pi/2$, $f_0 = 10$ кГц

Похожим образом $\varphi(t)$ может быть разложен на сигнал с частотой ω (циклическая частота измеряемого сигнала) и сдвиг из-за влияния окружающей среды $\psi(t)$:

$$\varphi(t) = D \cos \omega t + \psi(t). \quad (6)$$

При разложении в ряд Фурье получаем:

$$\cos \varphi(t) = \left[J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega t \right] \cos \psi(t) - \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega t \right] \sin \psi(t), \quad (7)$$

$$\sin \varphi(t) = \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(D) \cos(2k+1)\omega t \right] \cos \psi(t) - \left[J_0(D) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(D) \cos 2k\omega t \right] \sin \psi(t). \quad (8)$$

Эти уравнения, аналогично (3), показывают, что в случае $\psi(t) = 0$ в спектре присутствуют только четные гармоники частоты ω вокруг четных гармоник несущего сигнала с частотой ω_0 , а также нечетные гармоники частоты ω вокруг нечетных гармоник несущего сигнала (рис. 4).

При $\psi(t) = \pi/2$ в спектре присутствуют только нечетные гармоники частоты ω вокруг четных гармоник несущего сигнала с частотой ω_0 , а также нечетные гармоники частоты ω вокруг нечетных гармоник несущего сигнала (рис. 5).

Чтобы выделить $\varphi(t)$, сначала выделим амплитуды первой и второй гармоник частоты ω_0 из $i(t)$ с помощью смесителя, перемножив $i(t)$ с $G\cos \omega_0 t$ и $H\cos 2\omega_0 t$, соответственно. Данные сигналы подают на фильтр нижних частот, на выходе которого получаем амплитуды основной и второй гармоник, соответственно:

$$-2AG J_1(C) \sin \varphi(t), \tag{9}$$

$$-2AH J_2(C) \cos \varphi(t) \tag{10}$$

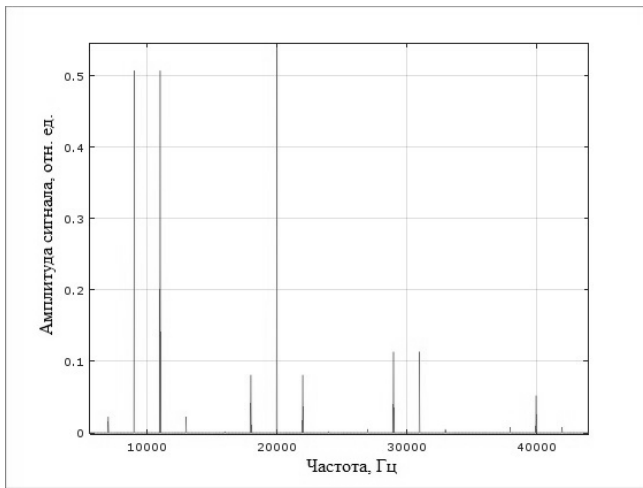


Рис. 4. Спектр сигнала при $\psi(t) = 0$, $f_0 = 10$ кГц, $f = 1$ кГц

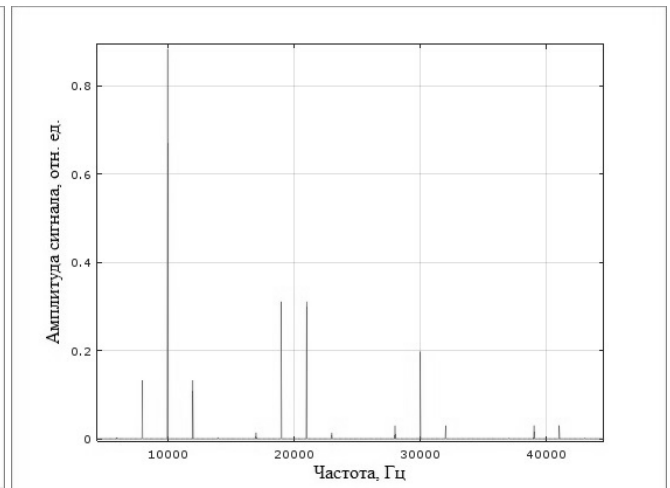


Рис. 5. Спектр сигнала при $\psi(t) = \pi/2$, $f_0 = 10$ кГц, $f = 1$ кГц

Затем дифференцируем обе компоненты по времени:

$$-2AG J_1(C) \cos \varphi(t) \dot{\varphi}(t), \tag{11}$$

$$2AH J_2(C) \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t). \tag{12}$$

Перемножив (10) и (11), а также (9) и (12), и вычтя второе произведение из первого, получим:

$$\begin{aligned} & (-2A)H J_2(C) \cos \varphi(t) (-2A)G J_1(C) \cos \varphi(t) \dot{\varphi}(t) - \\ & - (-2A)J_1(C) \sin \varphi(t) 2AH J_2(C) \sin \varphi(t) \dot{\varphi}(t) = \\ & = 4A^2 GH J_1(C) J_2(C) (\cos \varphi(t)^2 + \sin \varphi(t)^2) \dot{\varphi}(t) = \\ & = A^2 GH J_1(C) J_2(C) \dot{\varphi}(t). \end{aligned} \tag{13}$$

Таким образом, полученный сигнал прямо пропорционален производной фазы $\varphi(t)$. После интегратора сигнал будет иметь вид:

$$4A^2 GH J_1(C) J_2(C) \varphi(t). \tag{14}$$

Из формулы (14) становится понятно, что выходной сигнал прямо пропорционален произведению $J_1(C)J_2(C)$ и для обеспечения максимальной чувствительности волоконно-оптического интерферометра необходимо максимизировать данное произведение. Результаты моделирования, представленные на рис. 6, показывают, что максимальное значение, равное 0,2246, достигается при $C = 2,37$ рад, что согласуется с результатами, приведенными в литературе.

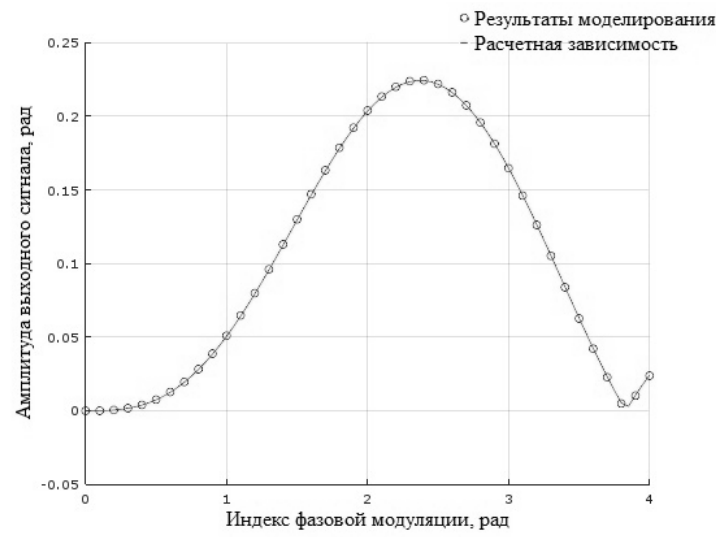


Рис. 6. Сравнение результатов расчетной и экспериментальной зависимостей амплитуды выходного сигнала от индекса фазовой модуляции C

Таким образом, получим искомую фазу $\varphi(t)$, из которой можно найти значение давления.

Достоинством данного метода является независимость выходного сигнала от положения рабочей точки интерферометра, что объясняет его широкое использование.

Недостаток – зависимость выходного сигнала от мощности лазера, т.е. неизбежные флуктуации мощности лазерного источника излучения приводят к отклонению демодулированного сигнала от измеряемого.

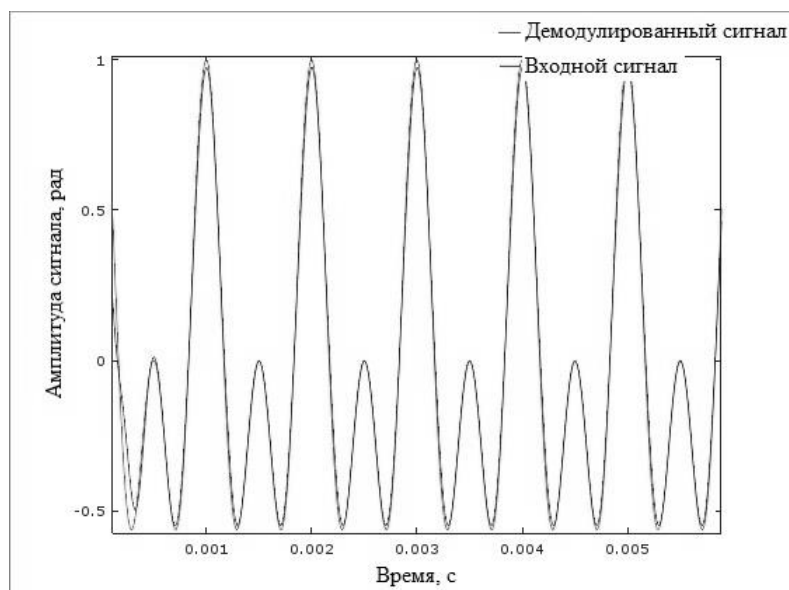


Рис. 7. Результат работы схемы демодуляции на основе перекрестного перемножения

Моделирование данной схемы демодуляции было проведено с использованием средств пакета программ математического моделирования MATLAB. В качестве фильтра нижних частот использовался фильтр Баттерворта из-за отсутствия пульсаций и гладкости его амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания. Фильтрация производилась с помощью функции `filtfilt`, которая исключает фазовый сдвиг, но в два раза увеличивает порядок фильтра. Для применения численного дифференцирования была реализована функция `diff`, вычисляющая производную в точке по четырем узлам. Численное интегрирование производилось с помощью встроенной функции `sumtrapz`, использующей метод трапеций.

Результат работы реализованного алгоритма приведен на рис. 7. Измеряемый сигнал равен сумме двух гармонических сигналов с частотами 1 кГц и 2 кГц, и амплитудами, равными 0,5 рад. Также используется нормировка на $J_1(C)J_2(C)$ и на V^2 . Из рисунка видно, что входной и демодулированный сигналы практически совпадают.

Схема демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса

Недостатком схемы гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения, как было изложено ранее, является зависимость выходного сигнала от мощности лазера. Был разработан ряд схем демодуляции, в которых влияние данного фактора исключено. Одной из них является схема гомодинного метода демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса [5], которая приведена на рис. 8.

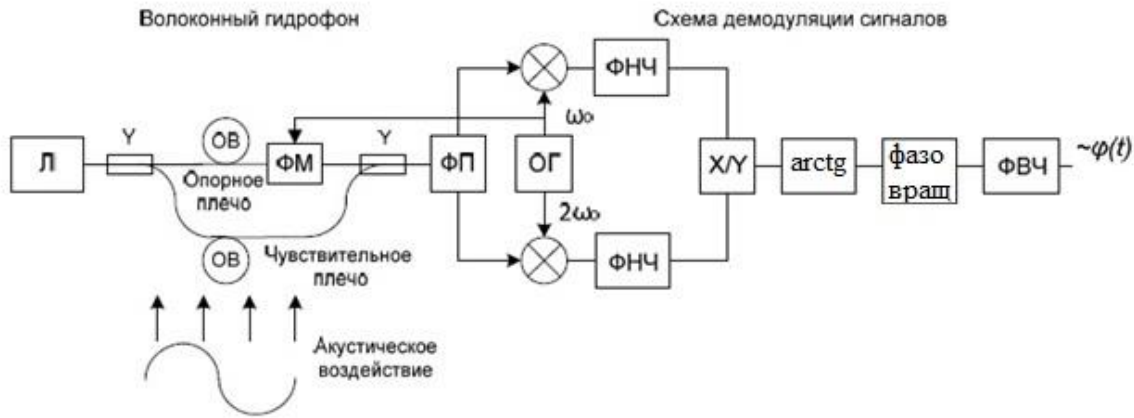


Рис. 8. Схема гомодинного метода демодуляции на основе вычисления функции арктангенса

Элементы данной схемы идентичны соответствующим элементам схемы на основе перекрестного перемножения, X/Y – блок деления, arctg – блок вычисления значений функции арктангенса, фазовращ – фазовращатель, ФВЧ – фильтр высоких частот.

Как было показано, в схеме на основе перекрестного перемножения амплитуды сигналов после фильтров нижних частот имеют вид

$$-2AG J_1(C) \sin \varphi(t), \tag{15}$$

$$-2AH J_2(C) \cos \varphi(t). \tag{16}$$

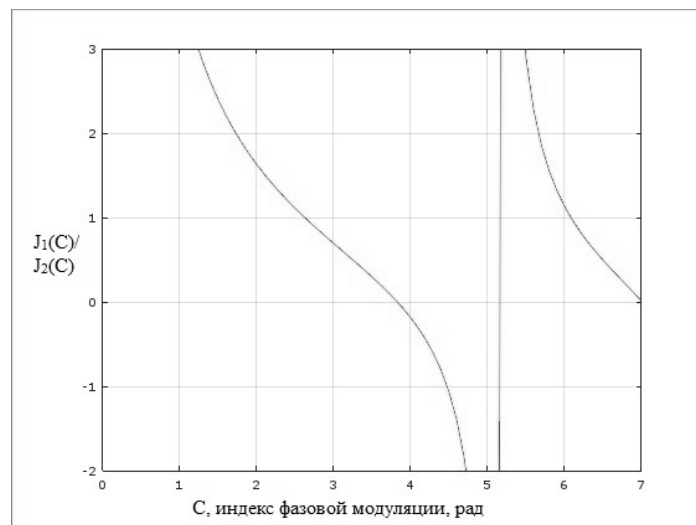


Рис. 9. Значения функции $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$ в зависимости от индекса фазовой модуляции

Тогда при делении (15) на (16) выходной сигнал будет равен $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \operatorname{tg}\varphi(t)$ при равных амплитудах G и H . Чтобы найти искомую фазу, необходимо разделить на $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$ и вычислить функцию арктангенса. Но в случае, если $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = 1$, процедуру деления производить не требуется. Построив зависимость $\frac{J_1(C)}{J_2(C)}$ от индекса модуляции C (рис. 9), на графике можно заметить, что $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = 1$ при $C = 2,63$ и $C = 6,09$.

При данных индексах модуляции результат после применения функции арктангенса будет без искажений. При индексе модуляции $C = 4,48$ $\frac{J_1(C)}{J_2(C)} = -1$, так как $\operatorname{arctg}(-x) = -\operatorname{arctg}(x)$, и для получения правильного результата необходимо инвертировать знак полученного значения.

Данный алгоритм был реализован с помощью пакета прикладных программ MATLAB, реализация левой части схемы аналогична реализации предыдущей схемы. Значения функции арктангенса вычислялись с помощью встроенной функции `atan`. Результаты работы модели представлены на рис. 10.

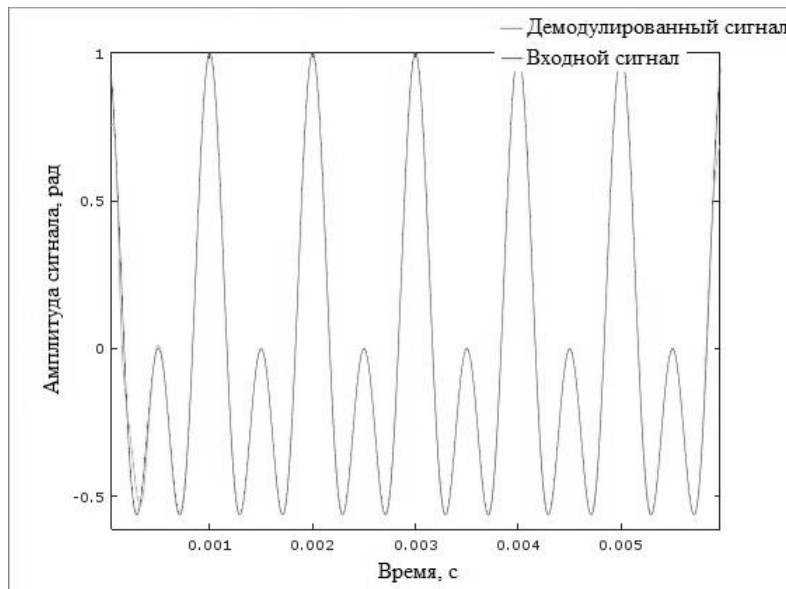


Рис. 10. Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала меньше $\frac{\pi}{2}$

Измеряемый сигнал равен сумме двух гармонических сигналов с частотами 1 кГц и 2 кГц, и амплитудами равными 0,5 рад.

Как известно, функция $\operatorname{arctg} x$ принимает значения в промежутке $\left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right)$, в то время как значения измеряемой разности фаз могут превышать это значение и достигать десятков радиан. Поэтому без применения фазовращателя выходной сигнал при амплитуде гармонического входного сигнала $A = 6$ рад и частоте $f = 1$ кГц выглядел бы так, как показано на рис. 11.

Алгоритм работы данного фазовращателя заключается в следующем: вычисляются значения функции арктангенса в двух соседних точках. Если разность $\geq \frac{\pi}{2}$, то из всех последующих значений вычитается $\frac{\pi}{2}$, иначе, если разность $\leq -\frac{\pi}{2}$, то ко всем последующим значениям прибавляется $\frac{\pi}{2}$.

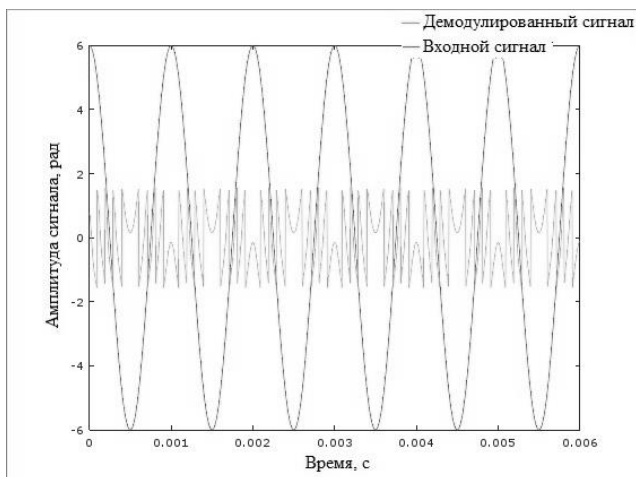


Рис. 11. Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала больше $\frac{\pi}{2}$ без использования фазовращателя

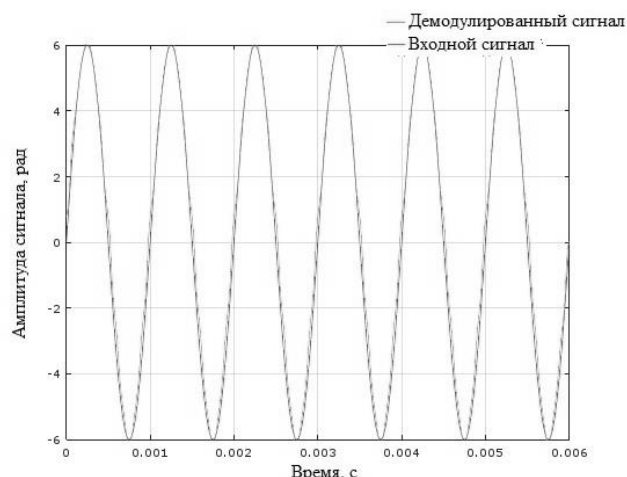


Рис. 12. Результат работы схемы демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса при амплитуде сигнала больше $\frac{\pi}{2}$ при использовании фазовращателя

Сравнение схем демодуляции на основе перекрестного перемножения и вычисления значений функции арктангенса

Амплитудные характеристики данных схем гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и вычисления значений функции арктангенса представлены на рис. 13.

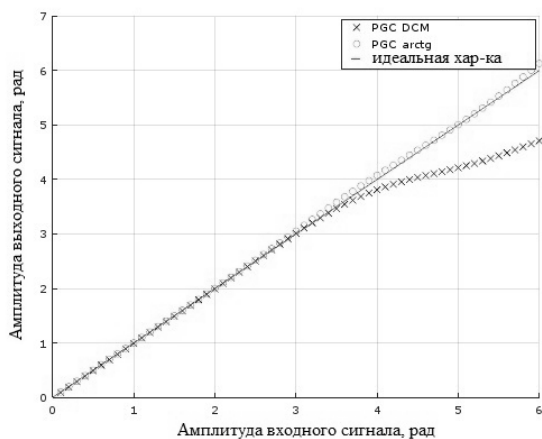


Рис. 13. Амплитудные характеристики схем демодуляции

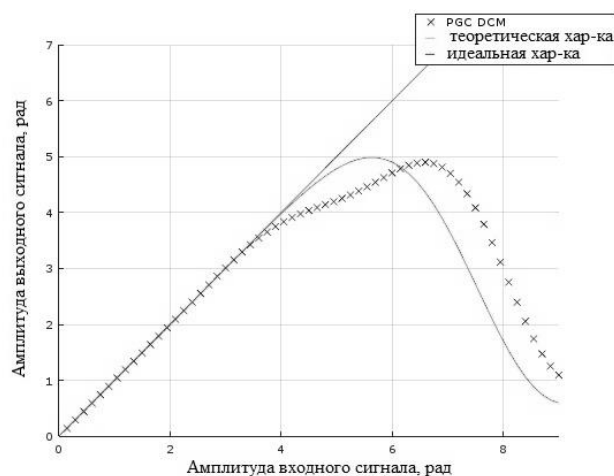


Рис. 14. Сравнение теоретической и экспериментальной амплитудной характеристик метода демодуляции на основе перекрестного перемножения

Из графика видно, что амплитудная характеристика первого метода значительно отличается от линейной. В литературе [6] показано, что амплитудная характеристика имеет вид:

$$2A^2 J_1(C) J_2(C) \sum_{k=0}^{N-1} J_k(D) J_{k+1}(D), \tag{17}$$

где N равно количеству гармоник измеряемого сигнала, укладываемых в полосу пропускания фильтра нижних частот.

Сравнение теоретической и экспериментальной [7] амплитудных характеристик для метода перекрестного перемножения представлено на рис. 14.

Качество работы реализованных демодуляторов можно оценить по табл. 1, в которой указана величина среднеквадратического отклонения в зависимости от вида модулирующего сигнала.

Таблица 1
Величина среднеквадратического отклонения (СКО) в зависимости от вида модулирующего сигнала

Модулирующее сообщение	Величина СКО при использовании PGC DCM	Величина СКО при использовании PGC arctg
Двухтональное (500 Гц, 1 кГц)	0,0004	0,0014
Двухтональное (500 Гц, 2 кГц)	0,0025	0,0016
Трехтональное (500 Гц, 1 кГц, 2 кГц)	0,0452	0,0023

Результаты в табл. 1 свидетельствуют о том, что СКО в первом методе резко увеличивается при усложнении сигнала.

Заключение

Была рассмотрена реализация схем гомодинного метода демодуляции на основе перекрестного перемножения и на основе вычисления значений функции арктангенса. Реализация производилась с помощью пакета прикладных программ MATLAB. Проверялась работоспособность данных схем на типовых сигналах. Полученные при моделировании амплитудные характеристики сравнивались с теоретическими характеристиками. Также оценивалось качество алгоритмов по величине среднеквадратического отклонения.

Из приведенного анализа становится ясно, что метод на основе вычисления значений функции арктангенса обладает большей точностью и его амплитудная характеристика линейна в большем диапазоне, поэтому при реализации схемы демодуляции в цифровом виде метод гомодинной демодуляции на основе вычисления значений функции арктангенса более предпочтителен.

Библиографический список

1. **Рыбьянец, А.Н.** Современное состояние и перспективы развития пьезоэлектрической керамики за рубежом / А.Н. Рыбьянец, В.П. Сахненко // Микросистемная техника. – 2002. – № 3. – С. 16–22.
2. **Fiber Optic Hydrophones.** Stockbridge: 2011. – 5 p.
3. **Eisenmenger, W.** Fiber optic probe hydrophone / W. Eisenmenger, J. Staudenraus, C. Wurster // Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium. – 1994. – V. 2. – P. 941–944.
4. **Dandridge, A.** Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier / A. Dandridge, T.G. Gialloronzi, A.B. Tveten // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – V. 18. – № 10. – P. 1647–1653. doi: 10.1109/JQE.1982.1071416
5. **Liao, Y.** The arctangent approach of digital PGC demodulation for optical interferometric sensors / Y. Liao, X. Mao, L. Wang, M. Zhang // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2006. V. 6292. Art. 62921E. doi: 10.1117/12.678455
6. **Плотников, М. Ю.** Волоконно-оптический гидрофон : дисс. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Плотников, М. Ю. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 155 с.

7. **Беликин, М.Н.** Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика / М.Н. Беликин [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т. 15. – № 6. – С. 1008–1014.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2018*

М.А. Zemlyanikin, Yu.V. Raevskaya

PROCESSING OF SIGNALS ACCEPTED BY FIBER-OPTICAL HYDROPHONE

Nizhny Novgorod state technical university. R.E. Alekseev

Purpose: Despite significant progress in building modern fiber-optic measuring sonar systems, there are still a number of problems that are not completely resolved. Therefore, detailed consideration requires the design of a fiber-optic hydroacoustic sensor, as well as its sensitive element, the organization of a network of fiber-optic hydrophones, the determination of optimal methods for demodulating interferometric signals and algorithms for their subsequent processing, which ensures the achievement of the goals set for the developer. The purpose of this work is to investigate the operation of possible demodulation schemes for signals coming from an interferometer included in a fiber-optic hydrophone, as well as algorithms for the subsequent processing of these signals.

Design/methodology/approach: The operation of demodulation circuits was tested using the MATLAB software package.

Findings: The analysis showed that the homodyne modulation scheme based on calculating the values of the arctangent function is more accurate and its amplitude characteristic is linear over a larger range, therefore, when the demodulation scheme is implemented digitally, the homodyne demodulation method based on calculating the values of the arctangent function is more preferable.

Research limitations/implications: Amplitude characteristics were obtained for circuits for two signal demodulation schemes (based on cross multiplying and calculating the values of the arc tangent function), a comparison was made between the theoretical and experimental amplitude characteristics.

Originality/value: The amplitude characteristics of the demodulation circuits and algorithms for processing interferometer signals obtained as a result of the investigation can be used in the future to design a fiber-optic hydrophone and organize a network of fiber-optic hydrophones.

Key words: fiber-optic hydrophone, amplitude characteristic, homodyne demodulation method.