

УДК 681.787

## МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СИГНАЛА ПОМЕХИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

С.В. Варжель, В.Е. Стригалеv

Рассматривается математический метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая гидроакустическая антенна, фазовый интерферометрический датчик, чувствительность фото-детектирования.

### Введение

В настоящее время, устранение влияния сигнала помехи на чувствительность приема волоконно-оптической гидроакустической антенны в случае одного фазового интерферометрического датчика (ФИД) можно обеспечить с помощью механической стабилизации положения рабочей точки фотодетектора. Однако, в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД, обеспечить стабилизацию с требуемой точностью и быстродействием вряд ли возможно. Поэтому, задачей данного исследования явилось рассмотрение возможности применения математического метода обработки сигнала, способного устранить влияние сигнала помехи.

### Принцип действия волоконно-оптической гидроакустической антенны

Принцип действия гидроакустической антенны на основе ФИД в простейшем случае (в случае одного ФИД) показан на рис. 1 и заключается в следующем.

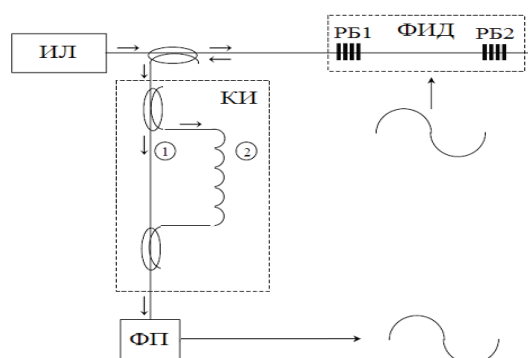


Рис. 1. Принцип действия ФИД

Каждая из решеток Брэгга РБ1 и РБ2 датчика отражает импульс, поступающий на нее от импульсного лазера (ИЛ), на одной и той же длине волны Брэгга. При этом временная задержка между отраженными импульсами равна удвоенному времени распространения света в чувствительном элементе датчика – волокне, заключенном между решетками. Отраженные импульсы поступают в компенсирующий интерферометр (КИ), который, в свою очередь, также раздваивает каждый из них. Задержка, вносимая в распространение импульсов плечом 2 КИ по отношению к плечу 1, обеспечивает перекрытие во времени импульса, отраженного от решетки РБ1, на выходе плеча 2 и импульса, отраженного от решетки РБ2, на выходе плеча 1 и сдвиг их по фазе на  $\varphi_0 = \pi/2$ . Изменения во времени деформации чувствительного элемента датчика в результате внешнего воздействия вызывают изменение разности фаз интерферирующих импульсов. Последнее преобразуется фотоприемником (ФП) в изменение величины тока. Дополни-

ный сдвиг фаз  $\varphi_0 = \pi/2$  между интерферирующими импульсами обеспечивает работу фотодетектора на участке максимальной крутизны, а равенство интенсивностей интерферирующих импульсов позволяет получить максимальную амплитуду сигнала на выходе фотоприемника [1, 2].

**Проблема достижения максимальной чувствительности фото-детектирования**

В случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД, появляется проблема достижения максимальной чувствительности фото-детектирования сигналов для всех датчиков гидроакустической антенны. Источниками этой проблемы являются различные внешние шумовые воздействия (помехи). Поэтому реальная разность фаз  $\varphi(t)$  информационного и опорного световых импульсов, отраженных, соответственно, от второй и первой решеток Брэгга ФИД, содержит, помимо полезного сигнала  $\chi(t) = D \cdot \cos(\omega \cdot t)$ , помеховую составляющую  $\psi(t)$

$$\varphi(t) = D \cdot \cos(\omega \cdot t) + \psi(t) . \tag{1}$$

При этом величина тока на выходе ФП определяется выражением

$$I(t) = A + B \cdot \cos[D \cdot \cos(\omega \cdot t) + \psi(t)] , \tag{2}$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные, пропорциональные интенсивности света на входе ФП.

Так, например, если полезный сигнал имеет вид, представленный на рис. 2 (сигнал с частотой 500 Гц и амплитудой 1 В), а помеховая составляющая задана в соответствии с рис. 3 (сумма помех с частотами 18, 50 и 75 Гц и амплитудами 1,1; 3,5; 0,5 В соответственно), то ток на выходе ФП будет иметь вид, представленный на рис. 4.

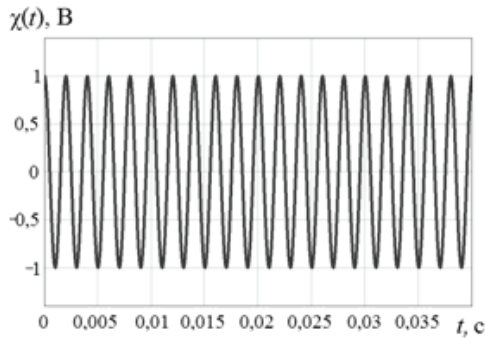


Рис. 2. Полезный сигнал

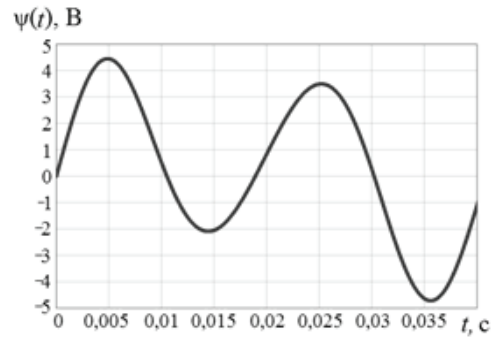


Рис. 3. Помеховая составляющая

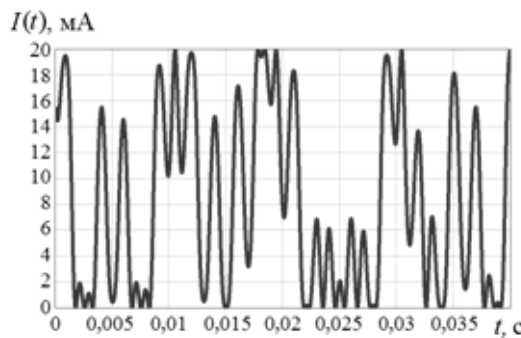


Рис. 4. Ток на выходе ФП

Так как амплитуда сигнала на ФП меняется с течением времени, то для правильной регистрации полезного сигнала необходима дополнительная обработка. В случае одного ФИД можно обеспечить стабилизацию положения рабочей точки фотодетектора путем оперативной подстройки разбаланса плеч КИ. Однако, как уже отмечалось во введении, в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества ФИД обеспечить стабилизацию с требуемой точностью и быстродействием вряд ли возможно. Причиной тому не только низкое быстродействие известных элементов регулировки, которые являются пьезоэлектрическими, но и низкая точность, с которой могут быть определены внешние шумовые воздействия на каждый из датчиков. Следовательно, можно отказаться от идеи механической стабилизации рабочей точки фотодетектора и исследовать возможность решения проблемы с помощью математического метода обработки сигнала.

Математический метод обработки сигнала

Существо метода заключается в следующем. Световой сигнал в одном из плеч КИ (рис. 5) модулируется по фазе радиосигналом высокого уровня, поступающим от генератора модулирующего сигнала (ГМС), с частотой  $\omega_0$ , лежащей за пределами диапазона рабочих частот датчика,  $C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)$ .

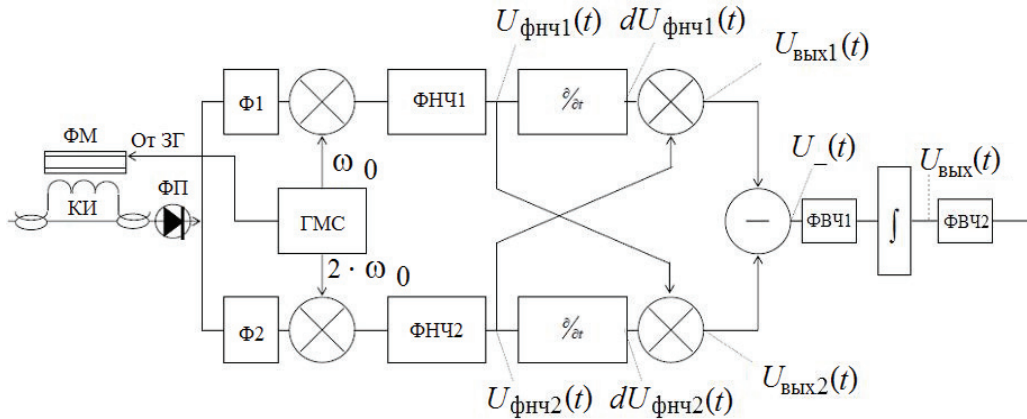


Рис. 5. Схема обработки сигнала ФП

В результате ток (2) на выходе ФП преобразуется к виду

$$I(t) = A + B \cdot \cos[C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \varphi(t)], \tag{3}$$

при котором изменение разности фаз интерферирующих импульсов зависит не только от полезного сигнала и помеховой составляющей, но и от амплитуды и частоты сигнала фазового модулятора (ФМ).

После разложения (3) в ряд по гармоникам частоты модулятора, коэффициентами которого являются функции Бесселя [3], получаем:

$$I(t) = A + B \cdot \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k}(C) \cdot \cos(2 \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t) \right] \cdot \cos[\varphi(t)] - \left[ 2 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot J_{2k+1}(C) \cdot \cos[(2 \cdot k + 1) \cdot \omega_0 \cdot t] \right] \cdot \sin[\varphi(t)] \right\}. \tag{4}$$

Если умножить сигнал (4) на первую и вторую гармоники модулирующего сигнала, а результаты умножения пропустить через фильтры нижних частот (ФНЧ), то на их выходах получим два квадратурных сигнала, изменение фаз которых уже не зависит от сигнала ФМ

$$\begin{aligned} U_{\text{ФНЧ1}}(t) &= -B \cdot G \cdot J_1(C) \cdot \sin[\varphi(t)] \\ U_{\text{ФНЧ2}}(t) &= -B \cdot H \cdot J_2(C) \cdot \cos[\varphi(t)], \end{aligned} \tag{5}$$

где  $G$  и  $H$  – амплитуды первой и второй гармоник модулирующего сигнала.

Производные этих сигналов по времени имеют вид

$$\begin{aligned} dU_{\text{ФНЧ1}}(t) &= -B \cdot G \cdot J_1(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \cos[\varphi(t)] \\ dU_{\text{ФНЧ2}}(t) &= B \cdot H \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \sin[\varphi(t)]. \end{aligned} \tag{6}$$

Перекрестное перемножение сигналов (5) и их производных (6) дает

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ1}}(t) &= B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \cos^2[\varphi(t)] \\ U_{\text{ВЫХ2}}(t) &= -B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \sin^2[\varphi(t)]. \end{aligned} \tag{7}$$

При этом перекрестное перемножение позволяет достичь полной идентичности амплитуд сигналов, исключив влияние не идентичности каналов обработки. Вычитая из первого сигнала (7) второй, получим

$$U_{-}(t) = B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}. \tag{8}$$

Затем данный сигнал (8) пропустим через фильтр верхних частот (ФВЧ1), который служит для устранения постоянной составляющей перед интегрированием. После интегрирования получаем

$$U_{\text{вых}}(t) = B^2 \cdot G \cdot H \cdot J_1(C) \cdot J_2(C) \cdot \varphi(t). \quad (9)$$

Как следует из полученного выражения (9) с учетом (1), сигнал на выходе пропорционален сумме полезного сигнала и помеховой составляющей и не зависит от положения рабочей точки фотодетектора. Таким образом, в спектре выходного сигнала помеха присутствует в виде слагаемого и может быть отфильтрована, так как отличается от него по спектру.

На рис. 6 можно видеть выходной сигнал до фильтра (ФВЧ2), в котором, помимо полезного сигнала на частоте 500 Гц, присутствует и помеховая составляющая, показанная на рис. 3, с амплитудой в несколько раз большей, чем амплитуда полезного сигнала. После фильтра (рис. 7) видно, что помеха была отфильтрована.

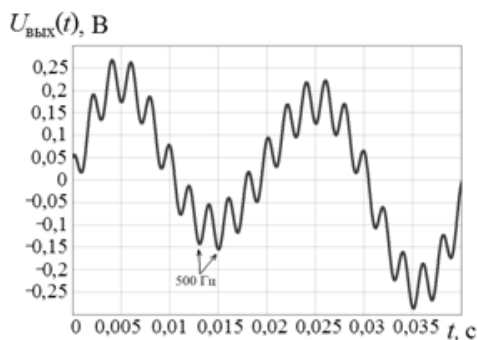


Рис. 6. Выходной сигнал до фильтра

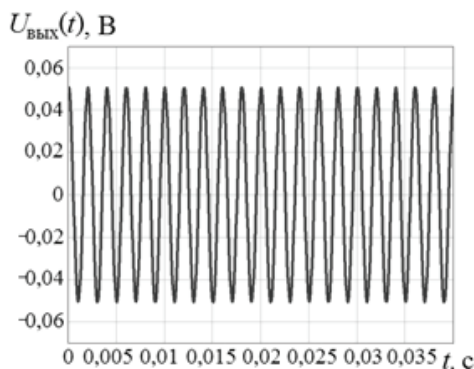


Рис. 7. Выходной сигнал после фильтра

### Заключение

Предложенный метод выделения сигнала от фазового интерферометрического датчика давления обеспечивает решение проблемы влияния сигнала помехи на чувствительность приема, даже в случае объединения в одном оптическом волокне большого количества (сотни) ФИД. В ходе исследования данный метод показал свою эффективность, и планируется его использование в схеме обработки сигнала разрабатываемой гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток.

### Литература

1. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера. – 2008. – 520 с.
2. Zhang W., Liu Y., Li Fiber F. Bragg grating hydrophone with high sensitivity // Chinese Optics Letters. – 2008. – V. 6. – Is. 9. – P. 631–633.
3. Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope. London, Artech House, 1992. – 313 p.

**Варжель Сергей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com  
**Стригалева Владимир Евгеньевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, профессор, vstrglv@mail.ru