

ФАЗОВАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В СИСТЕМЕ ОПРОСА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА

PHASE MODULATION OF LASER PULSE FOR FIBER-OPTIC HYDROPHONE INTERROGATION SYSTEM

1) **Зотов Алексей Михайлович**
канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник
E-mail: a.zotov@physics.msu.ru

2) **Качан Ирина Петровна**
инженер-исследователь
E-mail: i.p.kachan@gmail.com

2) **Корженевский Дмитрий Сергеевич**
инженер

2) **Яцеев Василий Артурович**
ген. директор
E-mail: yatseev@gmail.com

1) **Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва**

2) **ООО “Оптические измерительные системы”, Москва**

3) **ООО “Оптоволоконные системы безопасности”, Москва**

Аннотация: Предложен новый способ измерения акустического воздействия с помощью оптических гидрофонов путем обработки рефлектограммы, основанный на особенностях изменения фазы в chirпированном импульсе при использовании полупроводникового оптического усилителя с самомодуляцией фазы. Описана программная реализация алгоритма восстановления набега фазы в гидрофоне. Приведены результаты лабораторных и натурных испытаний программно-аппаратного комплекса.

Ключевые слова: гидрофон, акустический волоконно-оптический датчик, chirп, фазовая самомодуляция.

1) **Zotov Alexey M.**
Ph. D. (Phys. Math.), Senior Researcher
E-mail: a.zotov@physics.msu.ru

2) **Kachan Irina P.**
Research Engineer
E-mail: i.p.kachan@gmail.com

3) **Korzhenevskiy Dmitry S.**
Engineer

3) **Yatseev Vasily A.**
General Director
E-mail: yatseev@gmail.com

1) **Lomonosov Moscow State University, Moscow**

2) **Optical measuring systems, Ltd, Moscow**

3) **Fiber security, Ltd, Moscow**

Abstract: New procedure of acoustic pressure measurement in fiber optical hydrophone is proposed, based on self-phase modulation of the chirped laser impulse generated by semiconductor optical amplifier. Phase detection algorithm was designed and implemented in software. Bench and full scale tests results for hardware and software are given.

Keywords: hydrophone, acoustic fiber optical sensor, chirp, self-phase modulation, SOA.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваемый в работе гидрофонный комплекс относится к оптоволоконным системам детектирования акустических сигналов. Подобные системы имеют многочисленные типы конструкций и применения [1], в частности, в секторе разведки и добычи нефтегазовой отрасли — системы сейсмического зондирования морского дна с использованием монтажа крупномасштабных массивов из

трех акселерометров и гидрофона; в области вооружений — развертываемые на подводных лодках и на морском дне системы акустического мониторинга протяженных границ; в области физики высоких энергий — детектирование нейтрино путем регистрации звуковых волн, возникающих в воде при распространении адронных ливней [2].

Гидрофоны, использующие оптические датчики, имеют в сравнении со своими предшест-

венниками (электродинамическими, пьезокерамическими, магнитострикционными) более высокую чувствительность измерений, более широкий динамический диапазон, коррозионную стойкость, устойчивость к электромагнитному излучению, не требуют подвода внешнего питания. Важны также их малые масса и объем, легкая мультиплексируемость [3] и низкая стоимость изготовления чувствительных элементов.

Повысить соотношение сигнал/шум гидрофонов удается путем перемещения сигнала в высокочастотную область с помощью различных гетеродин-подобных систем модуляции [4]. Однако такие системы достаточно дороги и сложны в эксплуатации. Другим направлением улучшения гидрофонных систем является упрощение их конструкции при сохранении приемлемых эксплуатационных качеств, реализованное, в частности, в разработанной системе.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Детектирование акустических волн $\Delta P(t)$ в волоконно-оптическом гидрофоне основано на принципе измерения оптического пути $L(t)$ света при воздействии акустического давления на волокно [5]. Для усиления данного эффекта и достижения компактности гидрофона волокно обычно намотано на катушку специальной конструкции. Так как непосредственное определение оптического пути затруднено, его значения вычисляются по изменению фазы различными интерферометрическими методами. Задача детектирования акустических волн, таким образом, сводится к определению изменения фазы $\Delta\phi(t)$ в дискретные моменты времени для определения $\Delta P(t)$.

Рассмотрим в качестве примера интенсивность в обычном двухплечевом интерферометре:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi_{1,2}), \quad (1)$$

где I_1, \dots, I_2 — интенсивность света, прошедшего опорные и чувствительные плечи соответственно.

Как видно из (1) одному значению интенсивности I в общем случае соответствует, даже при определении фазы в интервале $(-\pi, \pi)$, два значения фазы $\Delta\phi$. Кроме того, невозможно определить направление изменения фазы при прохождении точек минимума и максимума интенсивности, а в самих этих точках чувствительность крайне мала из-за нулевого значения производной. Решить данную проблему можно, например, используя в качестве конечного “смесителя” 3×3 разветвитель, дающий сдвиг фазы 120° на выходе, и два приемника или же фазовый модулятор на цирконате титанате свинца в одном из плеч (PZT) интерференционной схемы с пошаговым измерением фазы и применением численной схемы, аналогичной [6]. Такого рода схемы требуют дополнительного оборудования, его настройки, калибровки, монтажа и т. п.

Альтернативным способом, предлагаемым в данной работе, является использование естественных особенностей формирования фазы в амплитудно-модулированном сигнале. Проведенные исследования показали, что при интерференции сдвинутых по времени чирпированных (сжатых/растянутых) с помощью полупроводникового оптического усилителя (SOA) импульсов есть возможность однозначного определения фазы сигнала с помощью единственного приемника и без дополнительных усложнений оптической схемы.

Основная задача данной работы — разработка алгоритмов, учитывающих особенности взаимодействия чирпированных импульсов, и создание со-

ответствующего программного обеспечения (ПО), позволяющего захватывать сигнал с оптического гидрофона и преобразовывать его в акустический сигнал в нужном формате.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки оптического гидрофона приведена на рис. 1. Источник постоянного излучения — высококогерентный волоконный лазер на 1550 нм, работающий в непрерывном режиме. Модулятор SOA преобразует непрерывное лазерное излучение в последовательность импульсов с периодичностью 4000 Гц, длина импульсов D управлялась программно и составляла десятки метров. Чувствительным элементом гидрофона являлась катушка, изготовленная из стандартного волокна SMF длиной около 50 м. Излучение лазера частично отражалось от брегговских решеток, расположенных до и после катушки. При этом отраженный от дальней решетки импульс приобретал дополнительный набег фазы, связанный с величиной акустического давления. Детектором излучения служил лавинный фотодиод в линейном режиме. Отраженные импульсы оцифровывались с помощью скоростного АЦП на базе ПЛИС Spartan. Сигналы дополнительно аппаратно усреднялись для уменьшения шумов и передавались по протоколу TCP/IP в компьютер для обработки.

В установке применена схема измерения с повторяющимися импульсами, позволяющая опрашивать одновременно несколько датчиков расположенных последовательно на опти-

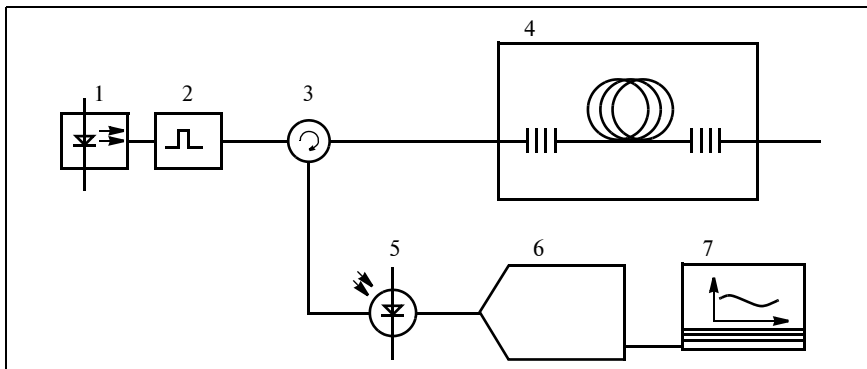


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — лазер; 2 — полупроводниковый оптический усилитель SOA; 3 — оптический циркулятор; 4 — чувствительная катушка гидрофона, длина волокна 50 м; 5 — лавинный фотодиод; 6 — высокоскоростной АЦП на базе ПЛИС Spartan; 7 — компьютер

ческом волокне. Импульсный режим позволил разделить датчики по времени запаздывания отраженного импульса. Последовательность импульсов создавалась с помощью лазера, модулируемого по току, или SOA в качестве модулятора. Особенностью схемы являлась прямая интерференция “хвоста” и “голова”, разделенных по амплитуде импульса без использования схем задержки.

МОДЕЛЬ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА

Измерения показали, что интерференция двух модулированных по амплитуде импульсов приводит не к обычной интерференции (рис. 2, а), а к “полосатой” картине интерференции, изображенной на рис. 2, б. Данная картина с небольшими вариациями наблюдается как при модуляции лазера по току, так и при внешней модуляции с помощью SOA. Причиной дополнительного набега фазы, приводящего к вертикальным полосам, является фазовая самомодуляция излучения (SPM), связанная с эффектом Керра, и

другие нелинейные процессы [7–9].

Природу образования полос можно объяснить, используя следующую модель: для chirпированного источника с единичной амплитудой и импульсом

длиной D в фиксированный момент времени можно записать:

$$A(x) = \exp(i(2\pi x/\lambda + \gamma(x)))$$

при $0 < x < D$;

$$A(x) = 0$$
(2)

в остальных случаях.

Здесь $\gamma(x)$ — малая фазовая поправка, характеризующая сложные нелинейные процессы (самомодуляция фазы в SOA или chirпирование в лазере, модулируемом по току); λ — длина волны в волокне. Величина изменений $\gamma(x)$ может составлять от долей до единиц радиан, а их длительность — несколько десятков наносекунд. При интерференции сдвинутых на расстояние L импульсов типа (2) в области их перекрытия возникает показанная на рис. 2, в, интерференция в разных сечениях,

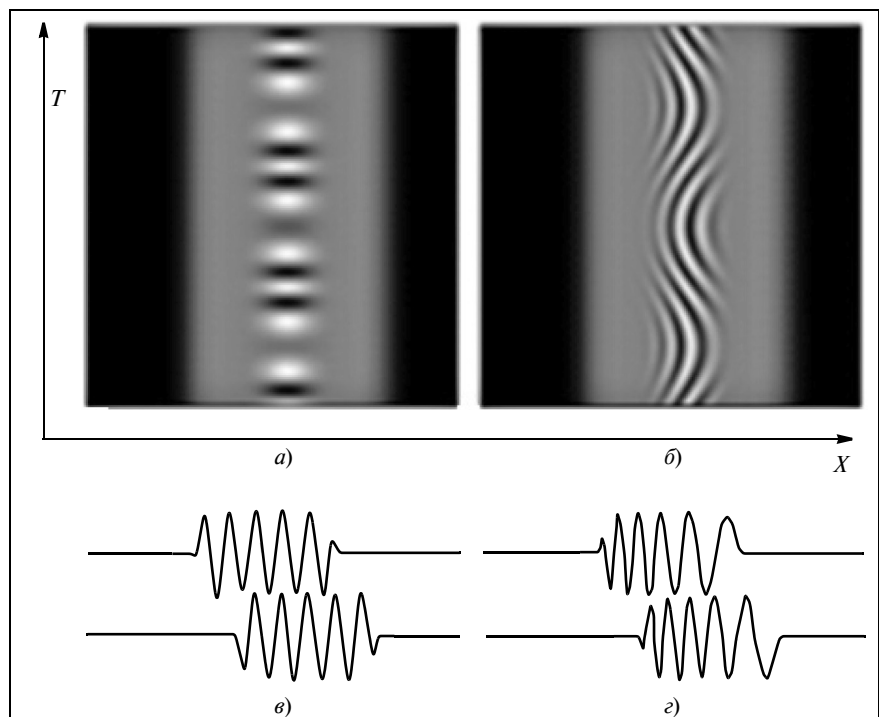


Рис. 2. Пространственно-временное распределение интенсивности, полученное в численной модели интерференции отраженных импульсов при периодическом воздействии на чувствительное волокно:

а — рефлектограмма “когерентного” импульса; б — рефлектограмма chirпированного импульса (по оси T отложены сечения в последовательные моменты времени, по оси X — задержка, пропорциональная длине волокна); в, г — условные графики пар “когерентных” и chirпированных импульсов с соответствующей задержкой

происходящая с разной относительной фазой. Для интенсивности интерферировавших импульсов имеем:

$$I(x, t) = |A(x) + A(x - L - \Delta L(t))|^2 = 2 \left(1 + \cos \left[\frac{2\pi(L + \Delta L(t))}{\lambda} + \gamma(x) - \gamma(x - L) \right] \right). \quad (3)$$

Здесь x — продольная координата; L — двойная длина чувствительного плеча гидрофона; $\Delta L(t)$ — малое изменение оптического пути, связанное с акустическим воздействием.

В (3), учитывая, что изменения $\Delta L(t)$ составляют доли или несколько λ , а $\gamma(x)$ значимо меняется на масштабах порядка метров, добавка $\Delta L(t)$ исключена из аргумента $\gamma(x)$. Из (3) видно, что в области перекрытия импульсов их относительная фаза $\gamma(x) - \gamma(x - L)$, зависящая от x , может изменяться вплоть до нескольких радиан.

Для анализа chirпированных рефлектограмм, аналогичных изображенным на рис. 2, ν , было создано ПО с алгоритмом обработки сдвинутых импульсов и возможностью восстано-

вления акустического сигнала, а также калибровки, захвата и спектральной фильтрации с сохранением акустических данных в звуковом (*.wav) формате.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ ПО ДВУМ ВРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЯМ

Для однозначного восстановления фазы по двум временным сечениям отметим, что, если в некоторой паре сечений x_1, x_2 верно соотношение

$$[\gamma(x_1) - \gamma(x_1 - L)] - [\gamma(x_2) - \gamma(x_2 - L)] = \pi/2, \quad (4)$$

то с точностью до фазовой константы C получаем:

$$I(x_1, t) = 2 \left(1 + \cos \left[\frac{2\pi\Delta L(t)}{\lambda} + C \right] \right), \quad (5)$$

$$I(x_2, t) = 2 \left(1 + \sin \left[\frac{2\pi\Delta L(t)}{\lambda} + C \right] \right).$$

Далее, после вычитания средней интенсивности $\langle I(x_1, t) \rangle$, фаза вычисляется как

$$\phi(t) = \arg [I(x_1, t) - \langle I(x_1, t) \rangle] + i [I(x_2, t) - \langle I(x_2, t) \rangle]. \quad (6)$$

Здесь $\langle \rangle$ обозначают усреднение по t , i — комплексная

единица, $\arg\{\}$ функция взятия аргумента комплексной функции.

Важной частью алгоритма детектирования фазы являлась калибровка. Основная задача калибровки — найти такое дополняющее сечение n (или суперпозицию соседних сечений $n, n + 1$), в котором верно выражение (4). Предположим, что одно из сечений действительно отстает от базового по фазе ровно на $\pi/2$, и все сечения нормированы по амплитуде. Найти номер n этого сечения можно, например, из условия минимальности среднеквадратичного отклонения σ выражения:

$$[I(x_0, t) - \langle I(x_0, t) \rangle]^2 + [I(x_n, t) - \langle I(x_n, t) \rangle]^2. \quad (7)$$

Очевидно, что только для сигналов вида (5) выражение (7) равно константе (так как $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = \text{const}$), а его среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0$.

На скриншоте ПО на рис. 3 (график C) видно, что после процесса калибровки фаза в разных сечениях $x, x + n$ (кривые 1 и 2) отличается сдвигом на $\pi/2$. Вертикальными штрихами показано, что интенсивность в одном

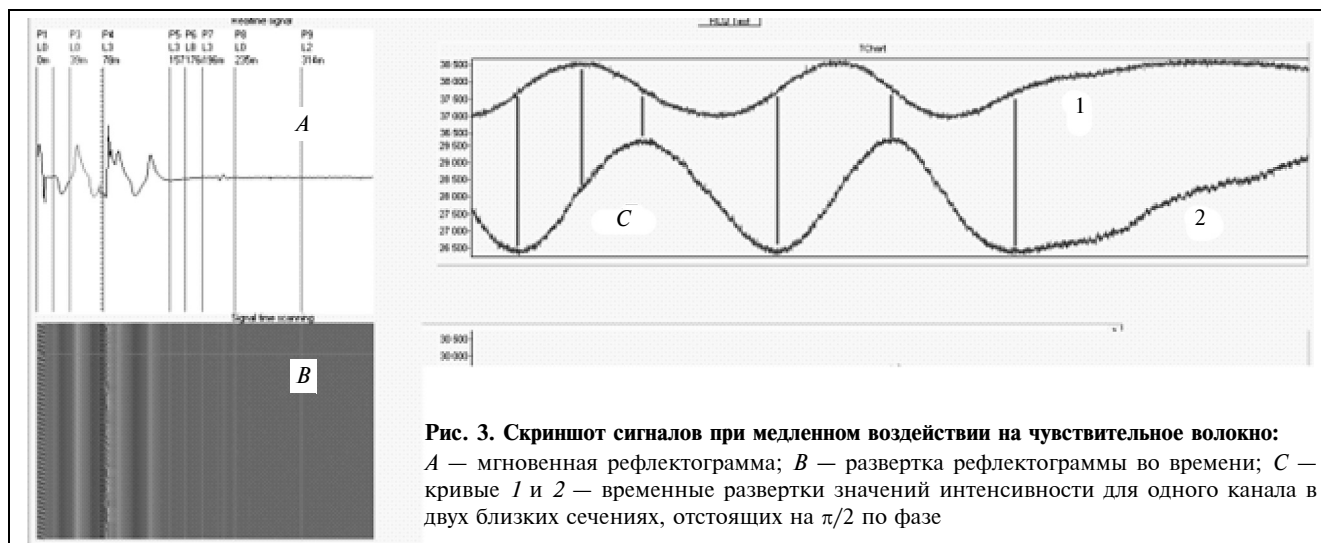


Рис. 3. Скриншот сигналов при медленном воздействии на чувствительное волокно: A — мгновенная рефлектограмма; B — развертка рефлектограммы во времени; C — кривые 1 и 2 — временные развертки значений интенсивности для одного канала в двух близких сечениях, отстоящих на $\pi/2$ по фазе

сечении достигает экстремума, когда значение во втором равно нулю.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗЫ ПО ГРУППЕ ВРЕМЕННЫХ СЕЧЕНИЙ

Недостатком метода определения фазы по двум сечениям является то, что найденное дополняющее сечение с индексом задержки n может по каким-либо причинам сдвигаться. Кроме того, сама калибровка зависит от степени перекрытия импульсов и отличается для разной длины намотки гидрофонов. Это приводит к необходимости частой перекалибровки и препятствует непрерывности работы системы. Альтернативным способом может быть одновременный учет всех сечений из полосы интерференции в области перекрытия. В фиксированный k -й отсчет времени t_k зависимость

$$\cos\left(\frac{2\pi(L + \Delta L(t))}{\lambda} + \gamma(x) - \gamma(x - L)\right)$$

из (3) представляет собой псевдопериодическую кривую с фазой вдоль x :

$$f(x, t_k) = \frac{2\pi(L + \Delta L(t_k))}{\lambda} + \gamma(x) - \gamma(x - L), \quad (8)$$

форма которой может быть восстановлена, например, преобразованием Гильберта. Если после удаления разрывов $\pm 2\pi$ построить непрерывную по x зависимость $f(x, t)$, видно, что изменение фазы в соседние моменты времени равно:

$$\begin{aligned} & \phi(t_1) - \phi(t_2) = \\ & = \sum_{n=1}^N [f(x_n, t_1) - f(x_n, t_2)]/N, \quad (9) \end{aligned}$$

где N — количество отсчетов в области перекрытия. Соответственно, интегрирование разности (9) по t дает нам искомую фазовую зависимость.

ОБРАБОТКА ФАЗЫ

Получаемая в представленных выше алгоритмах “сырая” фаза (рис. 4, кривые A) отличается от искомого акустического воздействия ΔP тем, что она определена только на интервале $(-\pi, \pi)$, и на нее наложен медленный температурный дрейф [10], вызванный изменением глубины погружения, влиянием течений различной температуры, остаточным напряжением материалов гидрофона. Чтобы убрать влияние этих факторов, каждое новое полученное значение фазы сшивалось (см. стрелки) с предыдущим таким образом, чтобы перейти к непрерывному значению фазы (рис. 4, кривая B). Далее полученная величина для устранения дрейфа пропусклась через низкочастотный цифровой фильтр с конечной импульсной характеристикой (рис. 4, кривая C).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах, проведенных в гидростатической камере с давлением от 1 до 8 МПа с использованием контрольного приемника, была подтверждена возможность регистрации аку-

стических сигналов с давлением 3 Па в диапазоне 50...500 Гц с приемлемым качеством и линейностью. Чувствительность системы была на уровне 1,5 Рад/Па. При более высоком акустическом давлении порог корректно регистрируемой частоты несколько снижался ввиду невозможности корректной сшивки значений при данной скорости работы АЦП.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При малом перекрытии импульсов порядка 3—4 отсчетов АЦП возможно использовать лишь метод работы по двум сечениям, если же область перекрытия составляет 6—10 отсчетов, в которых наблюдаются 1—2 или более периодов, то предпочтительней использовать метод определения фазы по группе сечений.

Предложенный способ обладает обычными недостатками, связанными с циклическостью фазы. Так, если за один отсчет фаза в чувствительном волокне изменится более, чем на π , сшивка фазы к ближайшему значению даст неверный результат. В этом случае щелчки и ударные волны, для которых

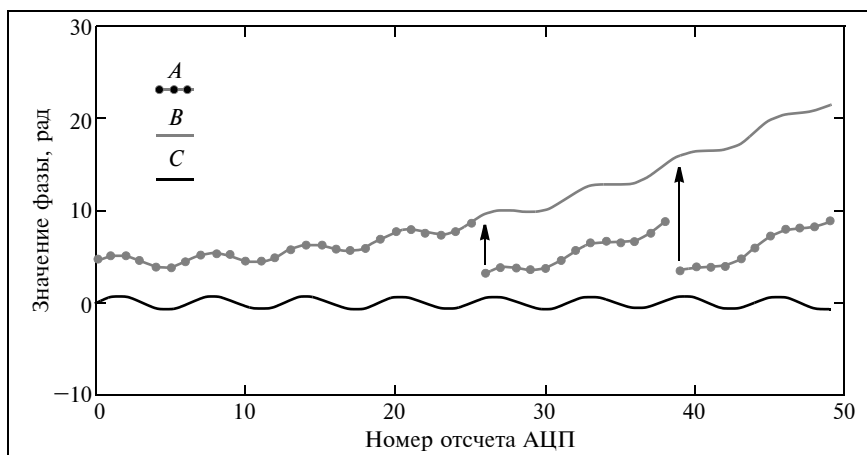


Рис. 4. Восстановление акустических колебаний по значениям фазы и удаление медленного теплового дрейфа

давление повышается слишком быстро, не могут быть правильно интерпретированы. Решить эту проблему можно путем повышения скорости оцифровки и обработки сигналов, например, переносом части алгоритмов в ПЛИС.

Основные достоинства предложенного способа — это отсутствие неопределенности направления изменения фазы и слабой чувствительности в “мертвых” точках без использования дополнительных регистрирующих устройств, а также лучшее соотношение сигнал/шум в случае детектирования по группе сечений в полосе интерференции за счет эффективного усреднения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hill D. J. The evolution and exploitation of the fibre-optic hydrophone // Proc. SPIE 6619, Third European Workshop on Optical Fibre Sensors, 661907 2 July (2007).
2. Бецис Д. Акустические детекторы нейтрино: Обзор. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/acustdet/index.html>. [Betsis D. Acoustic neutrino detectors; Review. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/acustdet/index.html>. (In Russian)]
3. Meng Zhou, Hub Yongming, Nib Ming, et al. Culshawa Brian Development of a 32-element fibre optic hydrophone system // Proc. of SPIE, Bellingham, WA. — 2004. — Vol. 5589.
4. Connelly M. J. Digital synthetic-heterodyne interferometric demodulation // Pure and Applied Optics J. Opt. A: Pure Appl. Opt. (2002).
5. Zujie Fang, Ken K. Chin, Ronghui Qu, Haiwen Cai. Fundamentals of Optical Fiber Sensors. — WILEY, 2012.
6. Milnes M., Tikhomirov A., Foster S., Goodman S. Fast Four Step Digital Demodulation for Multiplexed Fibre Laser Sensors // Proc. of SPIE. — 2008. — Vol. 7004, 700422.
7. Песков С. Н., Барг А. И., Колпаков И. А. Нелинейные искажения в волоконно-оптических кабелях // Теле-Спутник. — 2005. — № 11 (121). [Peskov S. N., Barg A. I., Kolpakov I. A. Nonlinear distortions in fiber-optic cables // Tele-Sputnik. — 2005. — № 11 (121). (In Russian)]
8. Baveja P. P., Maywar D. N., Kaplan A. M., Agrawal G. P. Self-Phase Modulation in Semiconductor Optical Amplifiers: Impact of Amplified Spontaneous Emission // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 2010. — Vol. 46, No. 9.
9. Krehlik P. Characterization of semiconductor laser frequency chirp based on signal distortion in dispersive optical fiber // Opto-Electronics Review. — 2006. — Vol. 14, Issue 2. — P. 119–124, June.
10. Бутусов М. М., Галкин С. Л., Оробинский С. П. Волоконная оптика и приборостроение. — Л.: Машиностроение, 1987. — 328 с. [Butusov M. M., Galkin S. L., Orobinskiy S. P. Fiber-optics and engineering. Leningrad: Engineering, 1987. — 328 p. (In Russian)]

УДК 621.317.2

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ УСТАНОВКИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

HARDWARE AND SOFTWARE MEANS FOR REGISTRATION OF ALTERNATING MAGNETIC FIELDS OF INSTALLATION FOR SELECTIVE LASER SINTERING OF MATERIALS

1) Гришин Сергей Александрович
ст. научн. сотрудник
E-mail: grs@mail@mail.ru

1) Климентовский Виталий Викторович
научн. сотрудник
E-mail: inel@tut.by

1) Чернышев Артем Игоревич
мл. научн. сотрудник
grs@mail@mail.ru

2) Кузнецик Олег Ольгердович
научн. сотрудник
E-mail: pmi.nil26@gmail.com

1) ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника” НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

2) ГНУ “Институт порошковой металлургии” НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

1) Hryshyn, Sergey A.
Senior Researcher
E-mail: grs@mail@mail.ru

1) Klimentovski Vitaly V.
Researcher
E-mail: inel@tut.by

1) Chernyshevich Artem I.
Junior Researcher
grs@mail@mail.ru

2) Kuznechik Oleg O.
Researcher
E-mail: pmi.nil26@gmail.com

1) State Research and Production Association “Optics, optoelectronics and laser technology” of NASB, Minsk, Republic of Belarus

2) State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute” of NASB, Minsk, Republic of Belarus