

## ЧАСТОТНАЯ И ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ С МАССИВА ОПТОВОЛОКОННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17786272>

Parpiyeva Shaxnoza

3Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi.

a) shaxnozamatqayitova@gmail.com

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрена проблема синхронизации сигналов в массивах оптоволоконных гидроакустических датчиков. Показано, что одним из наиболее важных факторов, влияющих на работу датчиков, является уровень собственного шума. Определен допустимый уровень фазового шума, возникающего вследствие работы системы синхронизации. Рассмотрены основные методы синхронизации, проанализирован уровень фазового шума в случае их использования. **Метод.** Для решения задачи синхронизации сигналов использован метод передискретизации сигналов. Возможность его использования оценивалась средствами математического моделирования в среде MATLAB. Показано, что добавление отсчетов в исследуемый сигнал приводит к значительному росту фазовых искажений. **Основные результаты.** Выполнена численная оценка воздействия нестабильности частоты тактового генератора на временное расхождение сигналов в случае отсутствия системы синхронизации. При отклонении тактовых частот генераторов на  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  расхождение достигает одной секунды через семь часов работы. Было показано, что при добавлении восьми отсчетов в секунду в синхронизируемый сигнал спектральные искажения достигают порядка  $100$  мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Предложен аппаратный метод синхронизации, позволяющий увеличить точность синхронизации без искажения спектральной и фазовой характеристик сигнала, реализуемый путем подстройки частот локальных генераторов тактовой частоты с использованием обратной связи. **Практическая значимость.** Предложены два метода синхронизации, позволяющие с использованием интерфейса Ethernet, согласно стандарту IEEE 802.3, синхронизировать систему датчиков. Аналитически и экспериментально оценена величина фазового дрожания между различными каналами измерительной системы. Методы могут быть

использованы в других системах, требующих синхронизации узлов с сохранением масштабируемости и гибкости всей системы.

### **Ключевые слова**

волоконно-оптический датчик, гидроакустические системы, временная синхронизация, джиттер, интерполяция

### **Abstract**

Subject of the study. The problem of signal synchronization in fiber-optic hydroacoustic sensor arrays is considered. It is shown that one of the most important factors affecting sensor performance is the inherent noise level. The permissible level of phase noise arising from the synchronization system is determined. The main synchronization methods are considered, and the phase noise level when they are used is analyzed. Method. A signal resampling method is used to solve the signal synchronization problem. The feasibility of this method was assessed using mathematical modeling in the MATLAB environment. It is shown that adding samples to the signal under study leads to a significant increase in phase distortion. Main results. A numerical assessment of the impact of clock generator frequency instability on the timing divergence of signals in the absence of a synchronization system was performed. With a deviation of the clock frequencies of the generators by  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , the divergence reaches one second after seven hours of operation. It was shown that when adding eight samples per second to the synchronized signal, spectral distortions reach about  $100 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ . A hardware synchronization method is proposed that allows increasing the synchronization accuracy without distorting the spectral and phase characteristics of the signal, implemented by adjusting the frequencies of local clock generators using feedback. Practical significance. Two synchronization methods are proposed that allow synchronization of a sensor system using the Ethernet interface, according to the IEEE 802.3 standard. The phase jitter between different channels of the measuring system is estimated analytically and experimentally. The methods can be used in other systems that require synchronization of nodes while maintaining scalability and flexibility of the entire system.

### **Keywords**

fiber-optic sensor, distributed hydroacoustic systems, frequency and phase synchronization, jitter, interpolation

### **Введение**

Измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков все чаще находят применение в задачах акустики и, в частности геологоразведки.

Это обусловлено рядом преимуществ таких систем, а именно высокими точностными характеристиками, устойчивостью к неблагоприятным эксплуатационным условиям и удобством мультиплексирования датчиков в сейсмических гидроакустических косах [1, 2]. Приведенные достоинства позволяют реализовывать на основе волоконно-оптических сенсоров протяженные массивы гидроакустических датчиков, что дает возможность регистрировать сейсмоакустические сигналы и использовать полученную информацию для решения задач геологоразведки [3, 4].

Одной из важных задач в построении волоконно-оптических гидроакустических массивов датчиков является организация системы синхронизации – согласование скоростей потоков данных между всеми каналами системы и компенсация относительных временных задержек между ними.

Система волоконно-оптических датчиков состоит из множества функциональных модулей, ответственных за оптоэлектронные преобразования, цифровую обработку сигналов, реализацию интерфейсов передачи данных и диагностический мониторинг параметров всей системы [5, 6]. Поскольку вычислительные возможности обрабатывающей электроники ограничены, для организации системы датчиков удобно использовать модульную схему, в которой одинаковые отдельные модули обрабатывают сигналы с различных групп датчиков. Однако при этом каждый функциональный модуль тактируется собственным генератором синхроимпульсов (local clock), имеющим тенденцию к дрейфу частоты [7]. Из-за различий в начальном состоянии и в величинах дрейфа частоты от модуля к модулю происходит рассогласование временных характеристик оцифрованных данных от отдельных групп датчиков. Это, в свою очередь, снижает точность оценок параметров детектируемых акустических сигналов и, как следствие, приводит к ошибкам при обработке зарегистрированных сигналов. В связи с этим актуально решение задачи синхронизации источников тактирования модулей сбора и обработки информации в измерительных системах.

Целью настоящей работы является поиск наиболее эффективных возможных решений задачи синхронизации сигналов с массива волоконно-оптических датчиков в составе протяженной волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы.

Требования к системе синхронизации волоконно-оптической гидроакустической системы

Как известно, существует несколько подходов к синхронизации групп датчиков – аппаратная синхронизация (на уровне полезного сигнала) и синхронизация пакетов данных, получаемых от разных модулей обработки сигналов. Синхронизация пакетов данных может осуществляться с использованием добавления или исключения отсчетов данных в сигналах с датчиков [8]. Однако при использовании этого подхода неизбежно возникновение в системе добавочного фазового шума, обусловленного искажениями регистрируемых сигналов (скачками фазы).

В случае синхронизации по методу единого глобального источника тактового сигнала (System – Synchronous) возникает ряд трудностей, а именно невозможно тестировать модули по отдельности (отсутствие автономности модулей) и необходимо учитывать время распространения синхросигнала до каждого модуля для компенсации задержек [8]. Кроме того, необходимость в отдельной защищенной тактовой линии, объединяющей все модули, приведет к увеличению энергопотребления всей системы. Наиболее важным фактором, ограничивающим использование метода синхронизации с одним глобальным синхросигналом, является рост как случайной, так и детерминированной составляющих джиттера (фазового шума) тактового сигнала по мере увеличения числа модулей и длины линии связи между массивами датчиков.

В связи с этими соображениями для организации синхронизации в гидроакустической системе глобальный синхросигнал использовать нецелесообразно. На практике каждый модуль в составе системы должен обладать собственным тактовым генератором. Однако даже если все тактовые генераторы будут в начальный момент времени приведены к общим фазе и частоте, в дальнейшем различие в показателях стабильности частоты и фазового джиттера приведут к потере синхронизации между сигналами от разных групп датчиков [8]. В связи с этим возникает необходимость в дополнительной внешней синхронизации модулей сбора и обработки информации в составе волоконно-оптической гидроакустической системы.

Одним из ключевых параметров любой гидроакустической системы является пороговая чувствительность, определяющая минимально обнаружимое давление датчиков системы. Этот параметр определяется отношением уровня собственных шумов системы и чувствительностью волоконно-оптических преобразователей, в свою очередь, определяющейся конструкцией элементов и длиной волокна. Эта чувствительность ограничена сверху требованиями к глубине размещения гидроакустической системы (уровнем гидростатического давления) [9]. Ограничение чувствительности

сверху обусловлено конечностью растягивающей нагрузки, которую способно выдержать чувствительное оптическое волокно при суммарном воздействии гидростатического и акустического давления. Указанное ограничение является негативным фактором для волоконно-оптических гидроакустических систем, поскольку не позволяет понизить порог срабатывания датчиков только лишь за счет увеличения их чувствительности. Таким образом, для повышения пороговой чувствительности необходимо снижение уровня собственных шумов системы.

Согласно работам [9, 10], собственные шумы в волоконно-оптических датчиках могут достигать от 10 до 100 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$  в диапазоне частот до 10 кГц. Любое превышение этого уровня, обусловленное работой системы синхронизации, основанной на добавлении или исключении отсчетов данных, приведет к росту фазовых шумов системы и ухудшению характеристик гидроакустической системы в части пороговой чувствительности.

Требования к параметрам системы синхронизации зависят от назначения гидроакустической системы. Так, для антенных решеток может быть достаточно сохранить синхронность сигналов с датчиков в пределах одного периода спектрального анализа – времени выборки порядка нескольких десятков секунд, в то время как для сейсмических задач, в которых используется временной, а не спектральный анализ сигналов, требуется сохранение синхронности в течение всего дневного цикла работ по геологоразведке. Нарушение синхронности записываемых сигналов с датчиков в последнем случае приведет к ошибкам в их интерпретации (построении «разреза» морского дна) и снижению достоверности полученной информации.

Кроме того, для сейсмических задач одним из ключевых параметров гидроакустических систем является также отношение сигнал/шум, поэтому при проектировании необходимо учитывать вклад работы системы синхронизации в уровень фазовых шумов выходных сигналов измерительной системы.

**Внешняя синхронизация модулей в волоконно-оптической гидроакустической системе**

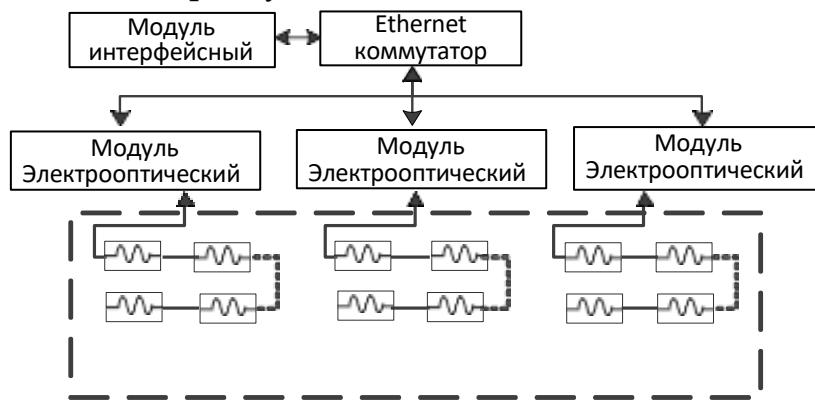
Волоконно-оптическая гидроакустическая измерительная система (рис. 1) состоит из массивов датчиков, которые опрашиваются электрооптическими модулями [11]. С использованием специализированных алгоритмов обработки сигналов [12–14] модули обрабатывают приходящие с датчиков интерференционные сигналы, формируя поток данных с заданной частотой

дискретизации. Из полученных данных далее формируются Ethernet-пакеты, которые пересыпаются через коммутатор на интерфейсный модуль. Интерфейсный модуль собирает полученные данные и синхронизирует их по времени, а также обеспечивает управление электрооптическими модулями. Такой подход позволяет легко масштабировать систему за счет использования стандартных промышленных интерфейсов Ethernet, однако при этом все электрооптические модули, формирующие потоки данных с датчиков, имеют различные тактовые генераторы, что является причиной несогласованности потоков данных.

Для того чтобы без глобального синхросигнала обеспечить временную когерентность модулей в составе системы, были подобраны высокостабильные ( $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ ) генераторы тактовой частоты CCPD-575. При таком рассогласовании тактовых частот с течением времени расхождение генераторов будет неизбежно накапливаться при работе системы. В результате математического моделирования оценено временное расхождение сигналов различных модулей: при отклонении тактовых частот генераторов на

$\pm 2 \cdot 10^{-5}$  расхождение достигнет одной секунды примерно через 7 ч работы всей системы, в то время как геологическая съемка может происходить непрерывно в течение месяца. Стандартными требованиями по синхронизации к существующим гидроакустическим системам является временное расхождение не выше  $2 \cdot 10^{-5}$  с. Достижение такого значения возможно при использовании дополнительной системы синхронизации на основе внешних синхросигналов. Подобный принцип компенсации временного

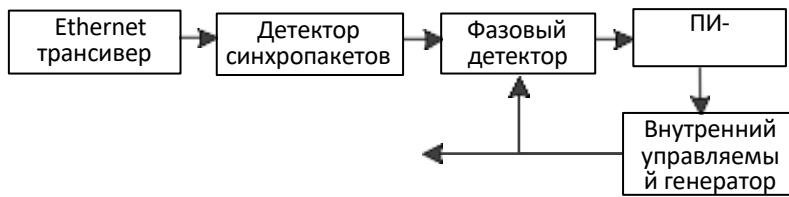
расхождения сигналов апробирован в рассматриваемой волоконно-оптической гидроакустической системе.



соответствует периоду формирования отсчетов выходных данных. Система формирования и передачи пакетов, как один из узлов системы передачи данных, реализована на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), благодаря чему неопределенность времени отправки синхропакета с ПЛИС не превышает одного периода тактирующего сигнала, в частности, в описываемом образце это время составляет 10 нс. В процессе прохождения через сеть синхропакет получает дополнительную случайную задержку распространения. Основной вклад в ее величину вносится в процессе коммутации телекоммуникационным оборудованием.

Для определения величины случайной составляющей собран тестовый стенд, имитирующий процесс обмена данными в исследуемой системе. Стенд включал плату с ПЛИС и два Ethernet-интерфейса, соединенных через коммутатор. Для эмуляции реальной нагрузки сети на одном из портов генерировался поток данных, идентичный потоку с электрооптического модуля в штатном режиме работы. Синхросигнал в стенде генерировался и принимался макетной платой с ПЛИС. Счетчиком, тактированным от 100 МГц, регистрировалось время между отправкой и принятием синхропакета. Было выявлено, что неопределенность времени доставки пакета составляет  $\pm 3$  периода тактирующего сигнала, т.е.  $\pm 30$  нс. Такое неопределенность времени доставки синхропакета обусловлена простой топологией транспортной сети с единственным узлом маршрутизации, детерминированной в штатном режиме работы макета скоростью передачи данных между функциональными узлами макета и полностью синхронной системой формирования и приема синхропакета на основе ПЛИС.

Для подавления выявленной временной неопределенности в электрооптическом модуле использована цифровая схема регенерации синхросигнала, передаваемого синхропакетом, позволяющая уменьшить уровень его фазовых шумов. Структурная схема регенерации представлена на рис. 2.



генерирует синхросигнал, который передается фазовому детектору. Фазовый детектор формирует сигнал ошибки подстройки внутреннего регулятора, вычисляя задержку между внешним синхросигналом и

синхросигналом, сформированным внутренним опорным генератором. Далее сигнал ошибки подается в пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор), формирующий значение периода внутреннего управляемого генератора. Управляемый генератор формирует опорный синхросигнал, фаза и частота которого приближаются в процессе подстройки к частоте и фазе внешнего синхросигнала. Такая схема позволяет компенсировать джиттер входного синхросигнала, а уровень его подавления и скорость подстройки будут определяться характеристиками регулятора в составе контура подстройки.

Следующей задачей, необходимой для синхронизации, является согласование выходного потока данных с частотой синхроимпульсов. Одним из решений поставленной задачи является передискретизация сигнала (преобразование частоты сэмплирования сигнала) [7, 8].

Существуют различные методы передискретизации сигналов. Некоторые методы, например последовательная кратная интерполяция (upsampling) и децимация (downsampling) сигнала, или передискретизация с использованием дискретного преобразования Фурье, реализуются с помощью цифровой обработки сигналов. Однако вычислительная сложность этих методов при некратных соотношениях частот исходного и передискретизированного сигнала значительно возрастает, что делает нецелесообразным их применение в поставленной задаче [7, 8].

Оптимальными по соотношению требуемых вычислительных ресурсов и степени искажения исходного сигнала являются методы передискретизации, основанные на кусочно-полиномиальной интерполяции. В этом случае участок сигнала аппроксимируется полиномиальной функцией, по которой рассчитываются значения передискретизированного сигнала.

В среде MATLAB проведено компьютерное моделирование процесса синхронизации путем добавления различного числа отсчетов в косинусоидальный сигнал с частотой 5 кГц, дискретизированного в схеме обработки сигналов с частотой 2 МГц. Частота дискретизации, соответствующая частоте дискретизации оптических сигналов с волоконно-оптических датчиков буксируемой косы, выбрана исходя из принципа работы алгоритма демодуляции интерференционных сигналов [11-14]. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

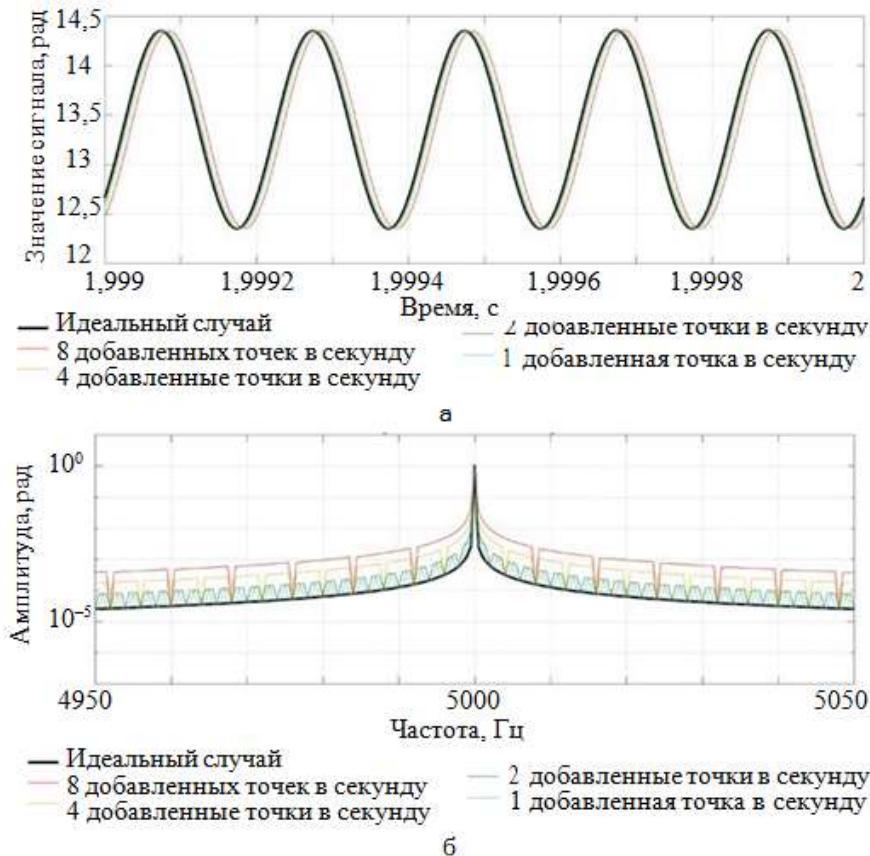


Рис. 3. Сравнение спектральных преобразований сигнала при добавлении различного числа отсчетов: сигнал с выхода обработки (а); спектр сигнала после обработки (б)

Согласно рис. 3, добавление отсчетов в моделируемый сигнал приводит к росту спектральных искажений. Чем больше добавляемых отсчетов (т.е. чем больше разница между потоками данных, которые необходимо выровнять таким образом), тем значительней спектральные искажения. При добавлении 8 отсчетов в секунду, что соответствует расхождению потоков 2 МГц сигналов на 4 Гц, спектральные искажения достигают порядка 100 мкрад/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , что неприемлемо для волоконно-оптических гидроакустических систем. Поэтому для волоконно-оптической гидроакустической системы необходима более совершенная система синхронизации, позволяющая выравнивать скорости потоков данных без ухудшения характеристик исходного сигнала.

Одним из наиболее действенных методов в данном случае является использование аппаратного метода – подстраиваемого тактового генератора. Структурная схема подобной системы представлена на рис. 4. В данной схеме передатчик синхропакетов генерирует через строго заданные промежутки времени сообщения, которые через сеть Ethernet доставляются приемнику синхропакетов. В приемнике сообщения преобразуются детектором синхропакетов в поток импульсов, которые используются для регулирования частоты управляемого тактового генератора с помощью контура цифровой фазовой

автоподстройки частоты (ФАПЧ). Поскольку возможная стабильность системы синхронизации определяется параметрами тактового генератора, а именно интегрированным фазовым шумом (в современных моделях может быть меньше 100 фс), этот метод позволит обеспечить синхронизацию потоков данных с групп волоконно-оптических датчиков с погрешностью до 10-10 с без внесения искажений в измеряемые сигналы.

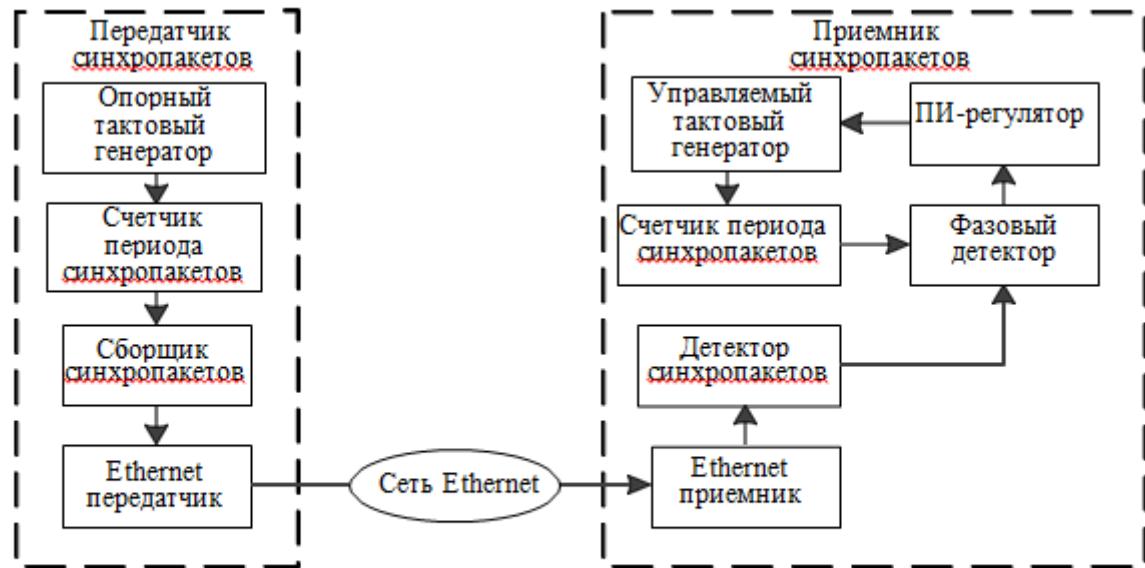


Рис. 4. Замкнутая система синхронизации с подстройкой частоты тактового генератора

### Результаты эксперимента

Для проверки возможности синхронизации потоков данных реальной волоконно-оптической гидроакустической системы на базе имеющегося макета реализована система синхронизация потоков данных с внешними синхропакетами и передискретизацией сигналов. Для оценки влияния синхронизации на качество данных в ходе эксперимента электрооптические модули работали в режиме генерации тестового сигнала частотой 500 Гц и амплитудой 1 рад, таким образом, все источники данных в составе системы генерировали идентичные сигналы.

Оценка результатов проводилась по расхождению числа генерированных электрооптическими модулями пакетов в секунду и спектральным преобразованиям сигнала при наличии синхронизации. Эксперимент проходил в три этапа. На первом измерено расхождение числа принятых интерфейсным модулем пакетов данных от различных электрооптических модулей. В среднем каждые 10 минут потоки данных расходились на 1 пакет (20 отсчетов), что при частоте дискретизации 5 кГц аналогично временному расхождению сигналов в 4 мс или рассогласованию скоростей потоков на 7·10<sup>-5</sup>. На втором этапе расхождение измерялось с включенной синхронизацией. На данном этапе временное расхождение

сигналов отсутствовало. Сравнение показало, что за 4 ч в асинхронном режиме принято 3 600 009 пакетов с первого и 3 599 986 – со второго электрооптического модуля, в синхронном по 3 600 000 с каждого модуля.

На третьем этапе сравнивались спектры синхронизированного и несинхронизированного сигналов, результаты сравнения представлены на рис. 5.

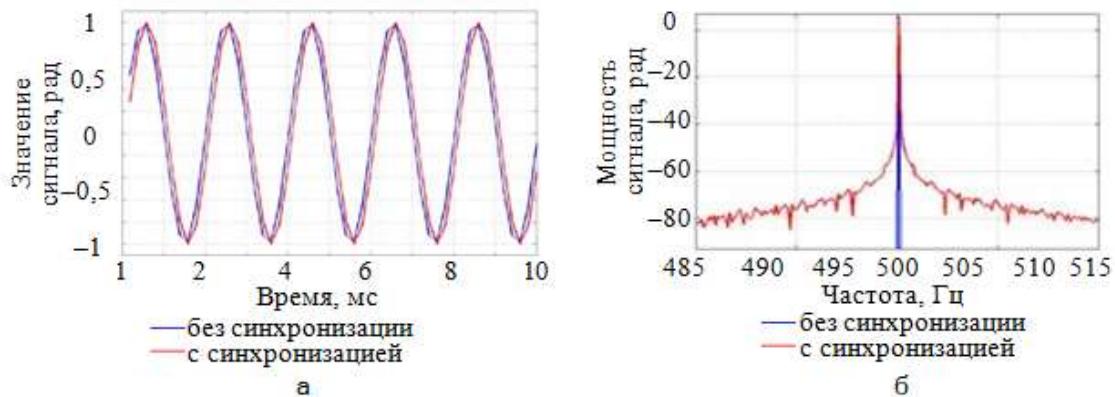


Рис. 5. Тестовые сигналы модулей обработки сигналов (а) и их спектры (б)

Из рис. 5 видно, что в спектре тестового сигнала с внешней синхронизацией появились небольшие гармонические искажения, вызванные передискретизацией сигнала, что соответствует результатам математического моделирования.

Таким образом, в результате экспериментальной реализации системы синхронизации потоков на

основе передискретизации удалось скомпенсировать времменное рассогласование. Спектры передискретизированных сигналов согласуются со спектрами, полученными при моделировании.

#### Заключение

Работа посвящена реализации системы синхронизации сигналов с массива волоконно-оптических датчиков в составе гидроакустической системы. В ходе исследования последовательно рассмотрены основные варианты построения системы синхронизации, описаны ее недостатки, обоснован переход к локальным тактовым генераторам и осуществлен выбор высокостабильных генераторов для макета волоконно-оптической гидроакустической измерительной системы.

Работа выполнена в ходе создания специального программного обеспечения электрооптического модуля, демодулирующего сигнал с массива волоконно-оптических датчиков гидроакустического давления в блоке

предварительной обработки сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы.

По результатам работы гидроакустической системы сделан вывод о необходимости организации системы внешней синхронизации. С этой целью была реализована схема цифрового регенератора синхросигнала. Для согласования выходного потока данных с частотой синхроимпульсов проанализированы методы передискретизации сигнала. В результате моделирования выбран метод линейной интерполяции и продемонстрировано, что в процессе передискретизации шумы сигнала возрастают пропорционально рассогласованию частот. Сделан вывод о целесообразности дополнения существующей системы механизмом регулирования частот локальных тактовых генераторов в составе отдельных модулей. Такая концепция реализуется посредством модификации электрооптических плат в составе модулей, в частности заменой статических генераторов синхросигнала на генераторы с программным управлением частотой.

Результаты проведенного эксперимента показали, что система синхронизации потоков на основе передискретизации позволяет компенсировать временное рассогласование потоков данных, скорость которых различается на 7·10<sup>-5</sup>.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 518 с.
2. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. Fiber Optic Sensors. 2nd ed. CRC Press, 2008. 492 p.
3. Cranch G.A., Nash P.J., Kirkendall C.K. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications // IEEE Sensors Journal. 2003. V. 3. N 1. P. 19–30. doi: 10.1109/JSEN.2003.810102
4. Nakstad H., Kringlebotn J.T. Realisation of a full-scale fibre-optic ocean bottom seismic system // Proceedings of SPIE. 2008. V. 7004. doi: 10.1117/12.791158
5. Быкадоров М.В., Плотников М.Ю., Волков А.В., Дмитра-щенко П.Ю. Исследование влияния коэффициента усиления эрбииевого волоконно-оптического усилителя на шумы волоконно-оптического интерферометрического датчика // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 4. С. 561–566.  
doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-561-566

6. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks // Measurement Science and Technology. 2011.

V. 22. N 5. P. 052001. doi: 10.1088/0957-0233/22/5/052001

7. Syed A.A., Heidemann J. Time synchronization for high latency acoustic networks // Proc. 25th IEEE Int. Conf. on Computer Communications INFOCOM. 2006. V. 6. doi: 10.1109/infocom.2006.161

8. Sampath A., Tripti C. Synchronization in distributed systems

// Advances in Computing and Information Technology. 2012. P. 417–424.  
doi: 10.1007/978-3-642-31513-8\_43

9. The Ocean Engineering Handbook / Ed. F. El-Hawary. Boca Raton: CRC Press, 2001. 416 p.

10. Плотников М.Ю., Волков А.В., Киселев С.С., Храмченко Е.А. Разработка и исследование защитного корпуса для волоконно-оптического гидрофона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 767–774. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-5-767-774

11. Lavrov V.S., Plotnikov M.Y., Aksarin S.M., Efimov M.E., Shulepov V.A., Kulikov A.V., Kireenkov A.U. Experimental investigation of the thin fiber-optic hydrophone array based