

УДК 621.396

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ  
ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК  
МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ  
С ГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

**А.В. Дейкун, О.В. Колмогоров**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
anna@vniiftri.ru,  
kolmogorov@vniiftri.ru*

*Аннотация. В статье представлены результаты исследования метода повышения точности измерений временных задержек между гармоническими сигналами, регистрируемыми устройством на основе двух аналого-цифровых преобразователей, проводящих математическую обработку полученных данных.*

*Ключевые слова: оптические гармонические сигналы, погрешность измерений, аналого-цифровые преобразователи, вычислительное устройство.*

**STUDY OF THE METHOD OF REDUCING  
THE UNCERTAINTY OF MEASURING  
TIME DELAYS BETWEEN OPTICAL SIGNALS  
WITH HARMONIC MODULATION**

**A.V. Deikun, O.V. Kolmogorov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
anna@vniiftri.ru,  
kolmogorov@vniiftri.ru*

*Annotation. The article presents the results of the study of the method for improving the accuracy of measuring time delays between harmonic signals recorded by a device based on two analog-to-digital converters that perform mathematical processing of the data obtained.*

*Key words: optical harmonic signals, measurement error, analog-to-digital converters, computing device.*

Измерения задержек между гармоническими сигналами, поступающими по двум каналам, необходимы при решении ряда задач, например, в системах сравнений шкал времени — для определения расхождения шкал времени СЧВ и удалённого эталона, размещённого на другом конце оптической трассы; в оптических фазовых дальномерах — для вычисления разности фаз между опорным и измерительным сигналами. Устройства, выполняющие эту функцию, применяются в таких СИ, системах и комплексах, где используется модуляция интенсивности оптического излучения гармоническим сигналом. Точность таких измерений снижается из-за шумов, присутствующих на трассе распространения сигнала и в приёмных трактах аппаратуры.

Для уменьшения влияния шумов при приёме гармонических сигналов могут использоваться устройства, реализующие гетеродинный приём сигналов с дополнительной вносимой задержкой, например [лит-ра], где используется зависимость амплитуды результирующего сигнала от значения задержки. Перспективным вариантом построения подобной аппаратуры, использующей возможности цифровой обработки данных, является устройство регистрации на основе двух аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и вычислительного устройства (ВУ).

Устройство предназначено для измерения задержек между опорным сигналом, формируемым генератором опорного сигнала ГОС, и измерительным сигналом, поступающим на вход устройства с оптической трассы (например, волоконно-оптической линии связи (ВОЛС)). Структурная схема устройства регистрации на основе двух АЦП и ВУ представлена на рис. 1.

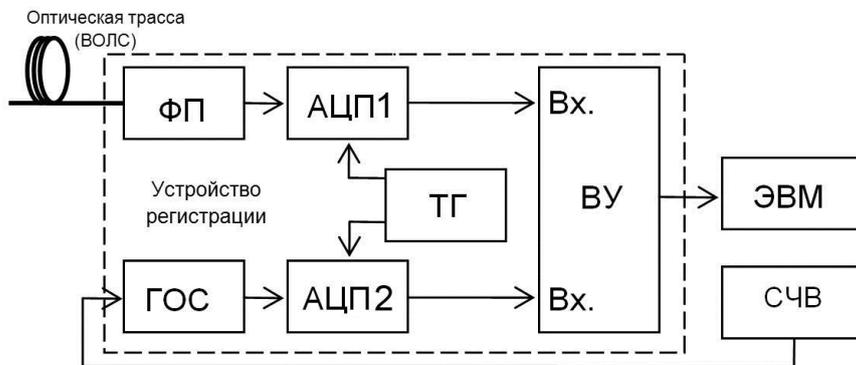


Рис. 1. Схема устройства регистрации на основе двух АЦП и ВУ

Устройство регистрации состоит из двух аналого-цифровых преобразователей АЦП1 и АЦП2, фотоприёмного устройства (ФП), генератора опорного сигнала (ГОС), вычислительного устройства (ВУ), тактового генератора (ТГ). По оптической трассе на вход ФП поступает импульс оптического излучения с модулированной по гармоническому закону амплитудой (или последовательность из ограниченного количества оптических импульсов). ФП преобразует оптический сигнал в электрический сигнал синусоидальной формы, который поступает на вход АЦП1, с которого сигнал в цифровой форме поступает на первый вход ВУ. ГОС, синхронизированный с внешним стандартом частоты и времени (СЧВ), формирующим шкалу времени, подаёт опорный синусоидальный сигнал на вход АЦП2, и далее цифровой сигнал поступает на второй вход вычислительного устройства ВУ. Тактовый сигнал подаётся на АЦП1 и АЦП2 с ТГ. ВУ вычисляет сумму двух сигналов, поступающих на его входы, и передаёт результаты на ЭВМ. По полученным

данным ЭВМ проводит вычисления временного сдвига между сигналом, пришедшим по ВОЛС, и сигналом с ГОС. Вычисленное значение временного сдвига может использоваться для решения различных измерительных задач, например: в системах сравнений шкал времени — для определения расхождения шкал времени СЧВ и удалённого эталона, размещённого на другом конце оптической трассы; в оптических фазовых дальномерах — для вычисления разности фаз между опорным и измерительным сигналами.

В предложенном устройстве частота модуляции гармонического сигнала после ФП совпадает с частотой синусоидального сигнала, формируемого ГОС. В схеме приёмника на основе аналогового устройства на вход подаются гармонический сигнал от ФП и опорный сигнал.

Для оценки перспектив использования в составе средств измерений рассмотренного устройства регистрации и метода обработки данных проведём оценку уменьшения погрешности определения задержек этим методом по сравнению с базовым методом — измерений задержки, основанным на фиксации пороговых значений сигналов (измерении интервалов времени между моментами перехода сигнала через заданные пороговые значения, например, 0).

Представим регистрируемые устройством данные в виде дискретных отсчётов сигналов с присутствием шума.

Данные, регистрируемые АЦП1 в измерительном канале:

$$S_{m_i} = \sin(\omega t_i + \tau) + n_m(t_i),$$

где  $\omega$  — частота;  $n_m(t_i)$  — мгновенное значение шума в измерительном канале в момент времени  $t_i$ ;  $\tau$  — измеряемая задержка.

Данные, регистрируемые АЦП2 в опорном канале:

$$S_{ref_i} = \sin(\omega t_i) + n_{ref}(t_i),$$

где  $n_{ref}(t_i)$  — мгновенное значение шума в опорном канале в момент времени  $t_i$ .

Суммарные значения отсчётов в опорном и измерительном канале для каждого момента времени  $t_i$ :

$$S_{\Sigma m_i} = S_{ref_i} + S_{m_i}; \quad S_{\Sigma mod_i} = S_{ref_i} + S_{mod_i},$$

где  $S_{mod_i}$  — вычисляемые значения моделируемого сигнала при задаваемом значении задержки  $\tau_{mod}$ :

$$S_{mod_i} = \sin(\omega t_i + \tau_{mod}).$$

По полученным значениям вычисляем сумму невязок  $\Sigma \delta$  (между суммарными сигналами):

$$\Sigma \delta = \sum_{i=1}^N (S_{\Sigma m_i} - S_{\Sigma mod_i})^2.$$

Моделирование сигнала с подбором задержки и вычислением невязок повторяем для нескольких значений  $\tau_{mod}$  в окрестности начального приближительного значения, затем находим точку, где сумма невязок минимальна — это и будет искомым значением задержки.

Сравнение двух методов определения задержек проведено путём математического моделирования, при котором для измерительных сигналов с различным уровнем шума вычислялось относительное уменьшение погрешности определения задержки.

Полученные при сравнении двух методов результаты приведены в таблице.

Таблица

Относительное уменьшение погрешности  $\delta$ , %, определения задержки исследуемым методом по сравнению с базовым методом при уровнях шума (СКО)  $\sigma_m$  в измерительном сигнале и  $\sigma_{ref}$  в опорном сигнале

Абсолютное значение задержки	Относительное уменьшение погрешности определения задержки					
	$\sigma_m = 0,1$	$\sigma_{ref} = 0,05$	$\sigma_m = 0,15$	$\sigma_{ref} = 0,05$	$\sigma_m = 0,1$	$\sigma_{ref} = 0,1$
0,5	14,5 %		20,8 %		17,1 %	
0,4	18,3 %		32,1 %		20,8 %	
0,35	35,9 %		40,9 %		38,4 %	

### Заключение

Проведённые исследования показали, что метод измерений временного сдвига между гармоническими сигналами, основанный на цифровой регистрации их мгновенных значений и последующей математической обработке с вычислением невязок суммарных сигналов, позволяет уменьшить погрешность измерений временного сдвига (задержки) на 15–40 % по сравнению с методом измерений интервалов времени по пороговым значениям сигнала.

### Список литературы

Харкевич А.А. Борьба с помехами. — 2-е изд. — М.: Наука, 1965.

*Статья поступила в редакцию: 14.10.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 18.10.2021 г.*

*Статья принята в работу: 22.10.2021 г.*