

# Дополнительное повышение точности измерения разности фаз путем вторичной синхронизации отсчетов разностной частоты

В.А. Жмудь<sup>1,2</sup>, А.В. Ляпидевский<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО НГТУ, <sup>2</sup>ИЛФ СО РАН, <sup>3</sup>ПАО «НИПС», Новосибирск, Россия,

<sup>4</sup>Технический университет Софии, София, Болгария

**Аннотация:** Актуальность измерения разностей фаз электрических сигналов для метрологии несомненна. В работе [1] детально рассмотрен метод получения сигналов разностной частоты при аналого-цифровом преобразовании аналогового гармонического сигнала. Показано с использованием математического моделирования в программе *VisSim*, что если, например, получать приблизительно четыре отсчета текущего значения частоты, с последующим разделением этих отсчетов на четыре отдельные последовательности, то каждая такая последовательность будет последовательностью отсчетов разностной частоты, то есть частоты, равной разности между частотой входного сигнала и частотой преобразования, деленной на четыре. Также показано, что эти отсчеты можно использовать для формирования когерентной и квадратурной компонент аналитического сигнала, и показано, как этот совокупный аналитический сигнал можно использовать для определения фазы или разности фаз. Однако, в статье [1] не рассмотрено детально, как осуществить привязку получаемых отсчетов к единой шкале времени. Действительно, получаемые отсчеты сдвинуты по фазе, что вносит погрешность при измерении высокочастотных компонент фазовых приращений. Данная статья предлагает и детально исследует метод привязки этих отсчетов к единой шкале времени. Методика проиллюстрирована сигналами, полученными путем математического моделирования.

**Ключевые слова:** измерение разности фаз, цифровая обработка сигналов, моделирование, фазометр, метрология, погрешность, точность, шумы измерений, модуляция, смещение, помеха

## ВВЕДЕНИЕ

Важность измерения фазы (разностей фаз) электрических сигналов столь же велика, как важность стабилизации разности фаз в фундаментальной лазерной метрологии и других применениях [1–26]. Несомненно, что

без точного измерения не может быть точной стабилизации.

В статье [1] показано, что вычисления разности фаз высокочастотного электрического сигнала могут быть осуществлены по простому алгоритму. На первом шаге работы этого алгоритма следует получать приблизительно четыре отсчета входного сигнала. При этом частота преобразования должна быть достаточно стабильной и заранее известной и лишь быть равной учетверенной частоте входного сигнала. Далее полученные отсчеты следует группировать в четыре различных последовательности, поочередно посылая их, например, в четыре разных сдвиговых многоканальных регистра. Простые операции с полученными значениями позволяют достаточно точно вычислить разность фаз между входным гармоническим сигналом и частотой преобразования, деленной на четыре. При наличии двух таких каналов для преобразования двух входных сигналов не сложно определить разность фаз этих сигналов. Естественно, что при неравенстве частот, разность фаз представляет собой непрерывно нарастающую функцию. Если разность фаз превышает полный период, правомочно говорить о разностной частоте. Но если разность фаз изменяется не слишком быстро, и если при определении этой величины не происходит ошибок, то правомочно говорить и о разности фаз как о функции времени, отслеживая эту величину.

В статье [1] при этом показано, что правильное отнесение отсчетов к соответствующим им моментам времени позволяет снизить ошибку определения разности фаз. Для долговременного мониторинга изменения средней разности фаз в относительно узком частотном диапазоне это дополнительное уточнение не существенно. Для измерения вибраций именно высокочастотная компонента фазовых приращений имеет наибольшее значение, поэтому для таких применений важно очень корректная привязка отсчетов к времени соответствующих изменений фазы. В данной статье решается этот вопрос, предлагаемый алгоритм апробируется путем моделирования в

программе *VisSim*, получаемые графики изменения сигналов приводятся с необходимыми комментариями.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть первый входной сигнал имеет вид:

$$U_1(t) = a_0 \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + n(t), \quad (1)$$

где  $a_0$  – амплитуда,  $f_1$  – частота,  $\varphi_1$  – фаза,  $n(t)$  – шум. Соответственно, второй сигнал имеет вид:

$$U_2(t) = b_0 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) + m(t), \quad (2)$$

с аналогичными обозначениями:  $b_0$  – амплитуда,  $f_2$  – частота,  $\varphi_2$  – фаза,  $m(t)$  – шум.

Фазометр должен измерять разность фаз этих сигналов  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ . Требуется минимизировать вклад в результат измерения всех мешающих факторов. К ним относят ВЧ и НЧ аддитивный шум  $n(t)$  и  $m(t)$ , амплитудная модуляция несущей частоты (изменение величин  $a_0$  и  $b_0$  во времени, то есть мультипликативный шум), смещение нулевого уровня.

Пусть фазометр на основе микроконтроллера с двумя АЦП на входе осуществляет преобразование сигналов с точно известной частотой преобразования  $f_0 \approx 4 f_1$ . Каждый из двух АЦП преобразует аналоговые входные сигналы в цифровые отсчеты с частотой преобразования  $f_0$ . Далее микроконтроллер может распределять каждую из получаемых последовательностей на четыре четырехкратно прореженных последовательности.

Далее каждые из этих последовательностей используются для вычисления когерентной  $X$  и квадратурной  $Y$  компонент сигнала разностной частоты  $\Delta f = f_1 - f_0$ . При этом фаза когерентной

компоненты  $X$  равна разности фаз входного сигнала  $U_1$  (или  $U_2$ ) и некоего опорного сигнала, который можно получить, разделив частоту реального опорного сигнала  $U_0$  на четыре.

Фаза квадратурной компоненты  $Y$  отличается на  $\pi/2$  от фазы когерентной компоненты [1]. Частота следования отсчетов когерентной и квадратурной компонент на выходе каналов обработки равна  $f_T = f_0/4$ . Пара когерентной и квадратурной компонент  $\{X, Y\}$  называется аналитическим сигналом. Микроконтроллер вычисляет фазы каждого из аналитических сигналов по известному соотношению [1]

$$\varphi_i = \text{atan2}(X_i, Y_i). \quad (3)$$

Здесь  $\text{atan2}(X, Y)$  – стандартная функция, равная  $\arctg(Y/X)$  для  $|Y| < |X|$  и  $\text{arctg}(X/Y)$  для  $|Y| > |X|$ . Эта функция определена на всем множестве  $\{X_i, Y_i\}$ . Если амплитуда сигнала не требуется, то вычислять достаточно только фазу по соотношению (4) [1]. В работе [1] показано, что получаемые отсчеты разностной частоты смещены друг относительно друга на четверть периода частоты преобразования. Необходимо получить и апробировать соотношения для расчета разности фаз таким образом, чтобы полученные результаты были привязаны к единой шкале времени.

### 2. СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПРИВЕДЕНИЯ ОТСЧЕТОВ К ЕДИНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ

Для выведения требуемых соотношений рассмотрим условные эпюры сигналов, показанные на *Рис. 1*.

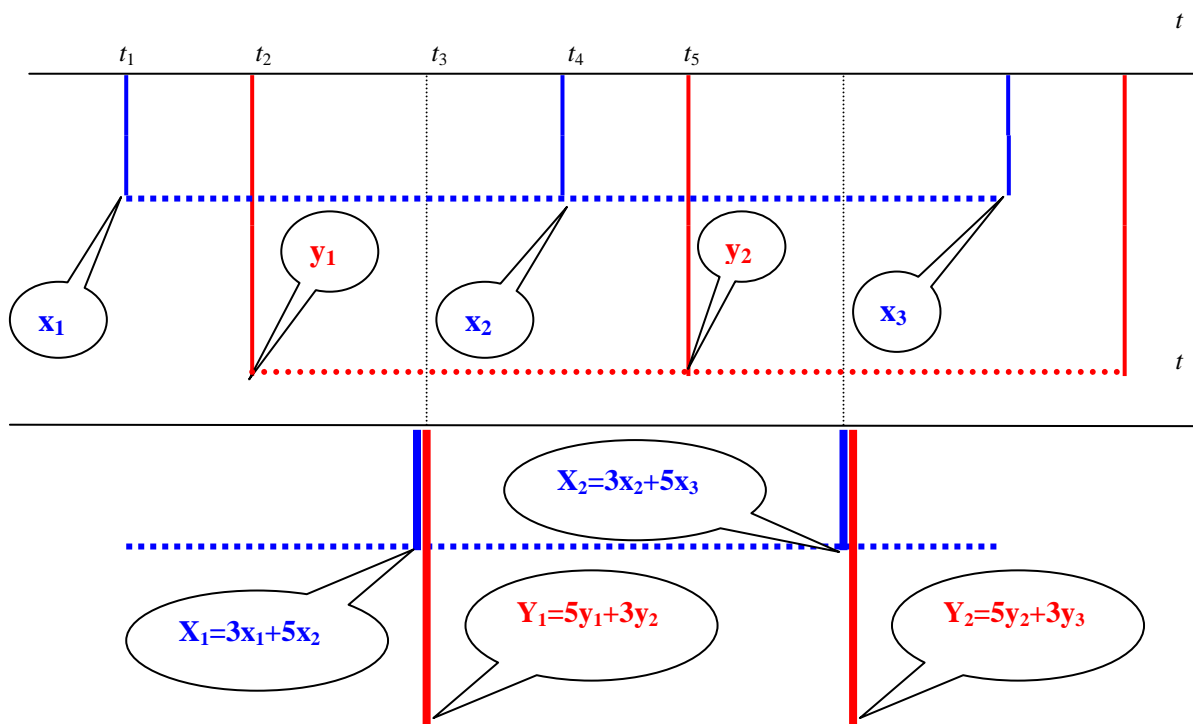


Рис. 1. Условные эпюры сигналов в фазометре

Из исходных последовательностей  $x_1, y_1, x_2, y_2 \dots$  необходимо вычислить последовательности, усредненных значений когерентной и квадратурной компонент, совпадающих во времени их получения:  $X_1$  и  $Y_1, X_2$  и  $Y_2$  и так далее. Расстояния между исходными последовательностями составляет восемь условных единиц, причем первый отсчет когерентной компоненты  $x_1$  отстоит от требуемой точки на пять таких единиц, а второй отсчет  $x_2$  на три единицы. Первый отсчет квадратурной компоненты  $y_1$  отстоит от требуемой точки на три единицы, а второй  $y_2$  – на пять единиц. Применяв простые геометрические методы для вычисления одного из оснований получаемых трапеций, получим искомые соотношения. Действительно, рассмотрим значения величины  $Y$  в моменты времени  $t_2$  и  $t_5$ , а также значения величины  $X$  в моменты времени  $t_2$  и  $t_4$ . Для каждой пары необходимо вычислить промежуточное значение, определенное для момента времени  $t_3$ .

Соотношения для вычисления этих пар из первых восьми отсчетов имеют следующий вид:

$$X_1 = (3 x_1 + 5 x_2) / 8, \quad (4)$$

$$Y_1 = (5 y_2 + 3 y_2) / 8. \quad (5)$$

С учетом соотношений для вычисления исходных значений, а также с учетом того, что деление можно не осуществлять, так как от масштабирования фазовые соотношения не изменяются, получаем:

$$X_1 = 3 (u_1 - u_3) + 5 (u_5 - u_7), \quad (6)$$

$$Y_1 = 5 (u_2 - u_4) + 3 (u_6 - u_8). \quad (7)$$

Здесь мы сохранили наименование для вычисляемых сигналов, хотя это на самом деле новые величины, которые в 8 раз больше, но для вычисления фазы, как ранее сказано, масштабное увеличение не имеет значения.

При получении новых четырех отсчетов эти в соотношениях (6) и (7) индексы левой части увеличиваются на единицу, а индексы правой части увеличиваются на четыре единицы:

$$X_2 = 3 (u_5 - u_7) + 5 (u_9 - u_{11}), \quad (8)$$

$$Y_2 = 5 (u_6 - u_8) + 3 (u_{10} - u_{12}). \quad (9)$$

И так далее.

### 3. РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗОМЕТРА

Простейшая аппаратная часто фазометра содержит только два АЦП и микроконтроллер [1]. Дальнейшая обработка может быть сделана программно, но также можно предложить аппаратную часть, что более важно для наглядного объяснения принципа действия, нежели для фактической реализации. Можно также выполнить это устройство в полностью аппаратном исполнении (как конечный автомат), или программно-аппаратном виде.

На *Рис. 2* показана возможная схема реализации фазометра на отдельных функциональных элементах. Показан лишь один канал, так как второй канал аналогичен (но микроконтроллер единственный, общий для обоих каналов).

Как видим из соотношений (6) и (7), для получения первого отсчета аналитического сигнала требуется восемь отсчетов входного сигнала. Для их одновременной обработки требуется сохранение первых семи отсчетов, то есть нужны семь сдвиговых регистров, так как последний отсчет может быть взят непосредственно с выхода АЦП, т. е. с входа первого регистра.

Структура каждого из каналов обработки данных соответствует описанным выше алгоритмам вычислений и содержит для этой цели семь регистров сдвига и два алгебраических сумматора с коэффициентами. Показанное устройство реализует вычисления по соотношениям (6) и (7), с каждым новым тактом полученные отсчеты сдвигаются вверх. Через каждые два такта информация из регистров передается в сумматоры для вычисления аналитического сигнала. Поэтому на каждом втором такте будут реализованы соотношения (8) и (9) и так далее.

### 4. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ПРИВЯЗКИ К ЕДИНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ

Также сдвиговые регистры могут быть заменены устройствами запаздывания, то есть сдвиг сигналов во времени можно осуществлять не только в цифровом виде (что проще и точнее), но и в аналоговом виде (что сложнее, но может быть более легко и наглядно проиллюстрировано методом математического моделирования в программе *VisSim*).

На *Рис. 3–4* показана структура для моделирования действия фазометра в программе *VisSim*. На *Рис. 4* показана структура для моделирования действия АЦП и регистров сдвига, входящих в состав фазометра. При этом формирователь модели входного сигнала и вид этого показаны на *Рис. 5*. Эта структура позволяет моделировать действие всех видов помех и модуляции. На *Рис. 6–8* даны результаты моделирования этого устройства в различных сочетаниях: с глубокой амплитудной модуляцией при отсутствии шумов, кроме постоянного смещения, которое на результат не влияет, как видно из этого рисунка (*Рис. 6*); то же с добавлением аддитивных гармонических помех (*Рис. 7*); то же с добавлением гауссова шума (*Рис. 8*), и то же со всеми видами шумов и помех, кроме амплитудной модуляции (*Рис. 9*).

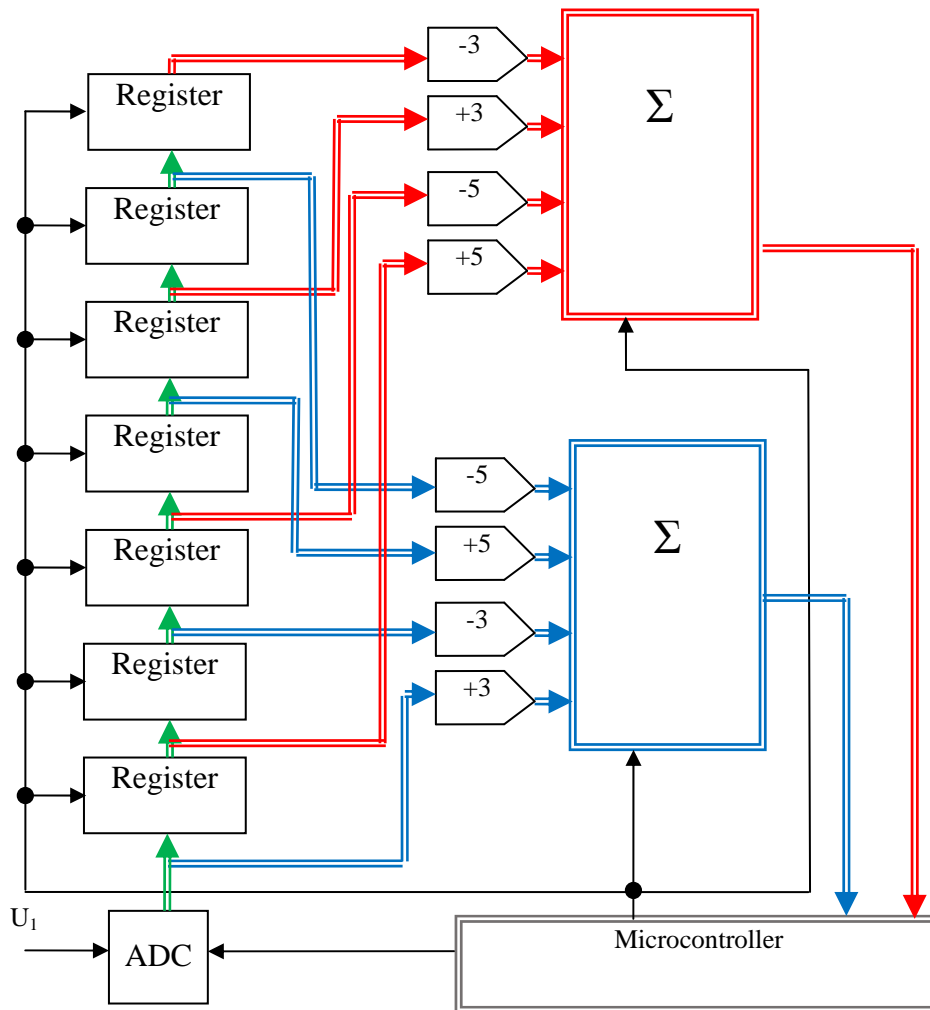


Рис. 2. Возможная схема реализации фазометра на отдельных дискретных элементах

Видно, что система обработки успешно справляется со всеми проблемами. Влияния постоянного смещения на результат не имеется вовсе, что является следствием вычитания. Влияние аддитивных гармонических помех сильно ослаблено. Влияние высокочастотных гауссовых шумов видно, но оно не приводит к срыву обработки, поскольку результирующая траектория достаточно далека от начала координат, то есть определение угла поворота вектора из начала координат к любой точке этого графика может быть осуществлено достаточно надежно и с малой ошибкой.

На Рис. 10 показана модификация структуры обработки, состоящая в использовании двух низкочастотных фильтров первого порядка в каждом канале. Результат такой фильтрации показан на Рис. 11. Видно, что фильтр работает эффективно, девиации сигнала, получаемого в результате обработки, существенно снизились по амплитуде и сгладились.

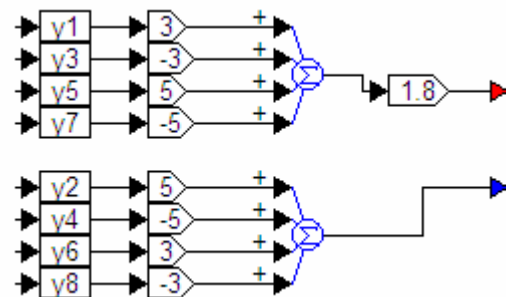


Рис. 3. Структура для моделирования действия фазометра по Рис. 2 (фрагмент)

Напомним, что все метки шин, имеющие одинаковое обозначение, при моделировании считаются одной шиной, то есть указанные точки соединены. Это относится к меткам (значения в прямоугольниках) сигналов  $x_i$  и  $y_j$  на Рис. 3–5.

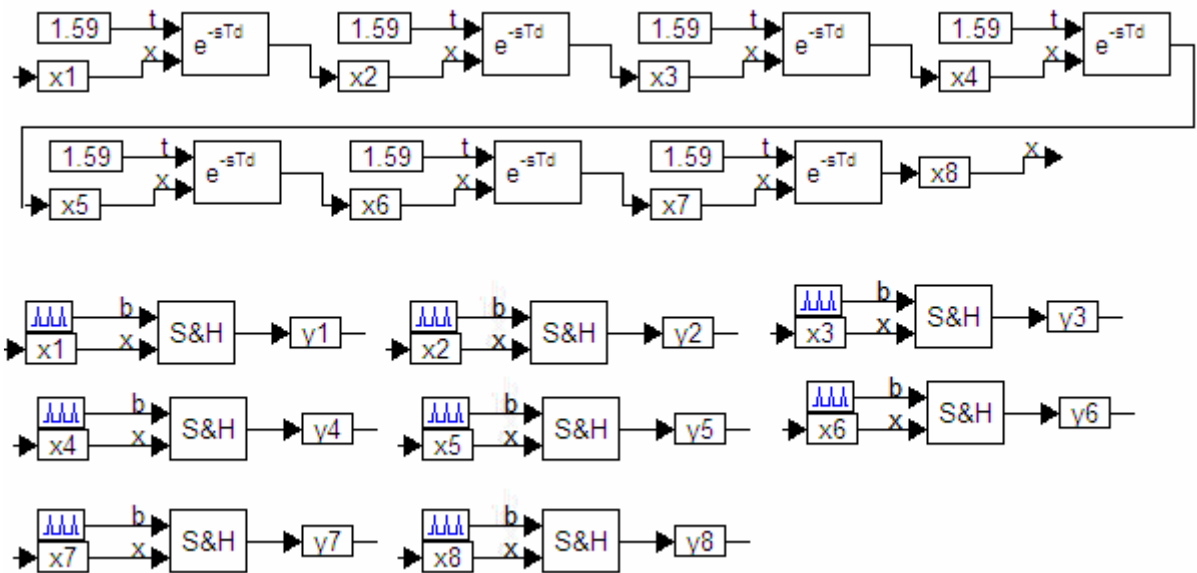


Рис. 4. Структура для моделирования действия фазометра по Рис. 2 (фрагмент)

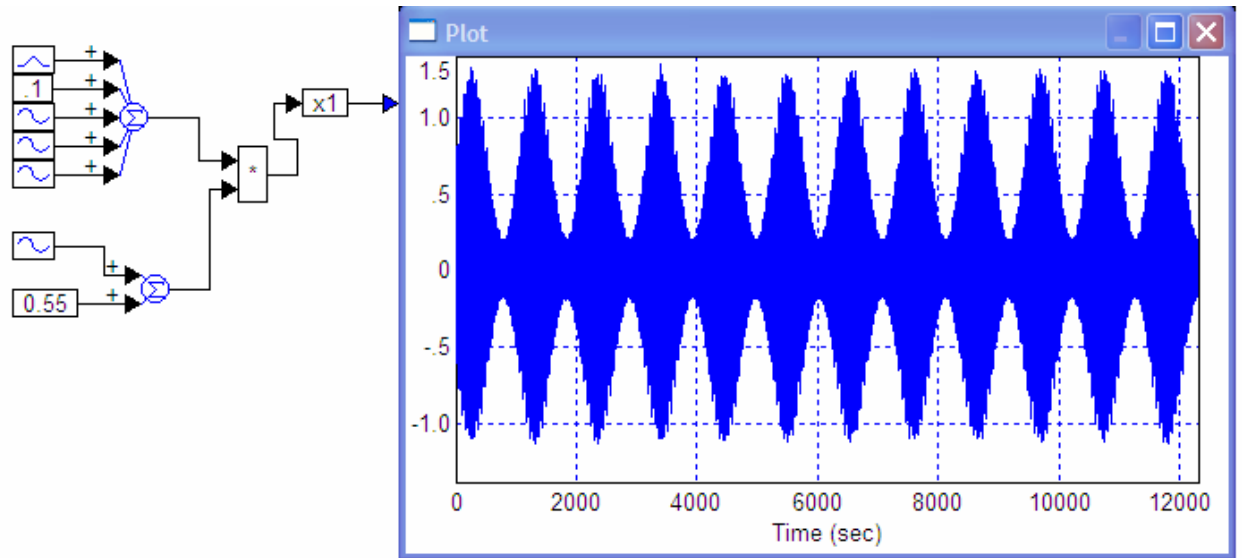


Рис. 5. Структура для моделирования действия фазометра: формирователь модели входного сигнала и вид этого сигнала при наличии всех видов помех и модуляции

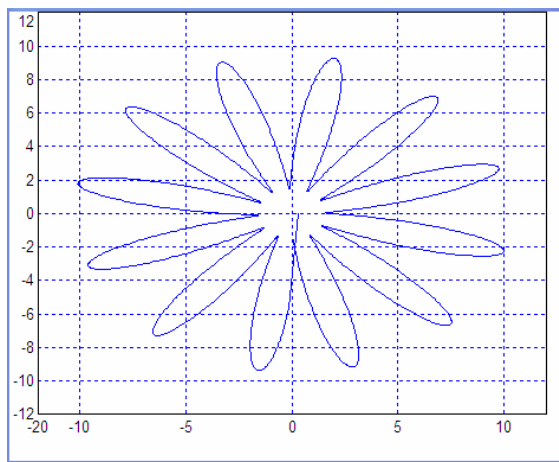


Рис. 6. Результат обработки сигнала фазометром при наличии только амплитудной модуляции и начального сдвига нуля (в отсутствие помех)

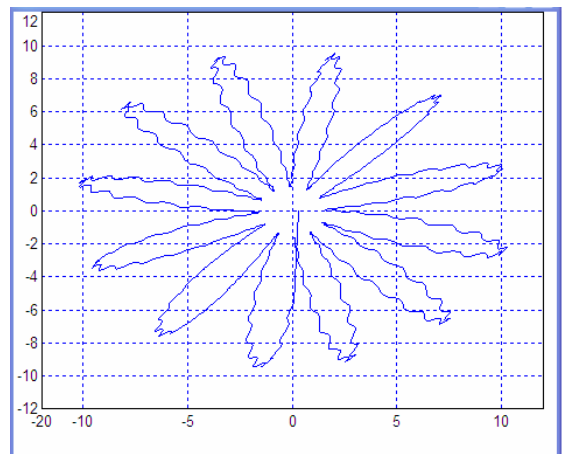


Рис. 7. Результат обработки сигнала фазометром при наличии амплитудной модуляции, начального сдвига нуля и аддитивных гармонических помех (в отсутствие гауссова шума)

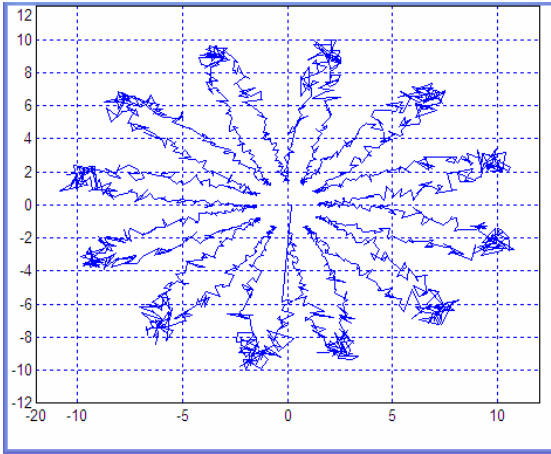


Рис. 8. Результат обработки сигнала фазометром при наличии всех видов мешающих факторов: амплитудной модуляции, начального сдвига нуля, аддитивных гармонических помех и гауссовых шумов

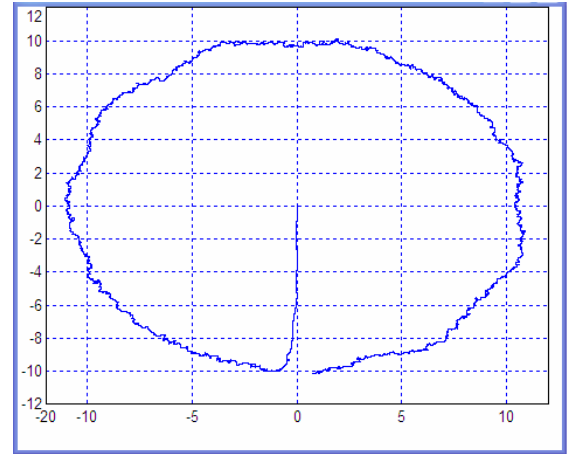


Рис. 11. Результат обработки сигнала фазометром при наличии всех видов мешающих факторов, кроме амплитудной модуляции – как в случае Рис. 9, но с использованием фильтров согласно Рис. 10

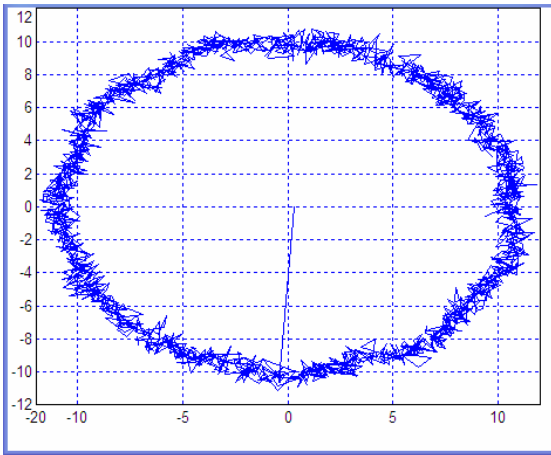


Рис. 9. Результат обработки сигнала фазометром при наличии всех видов мешающих факторов, кроме амплитудной модуляции

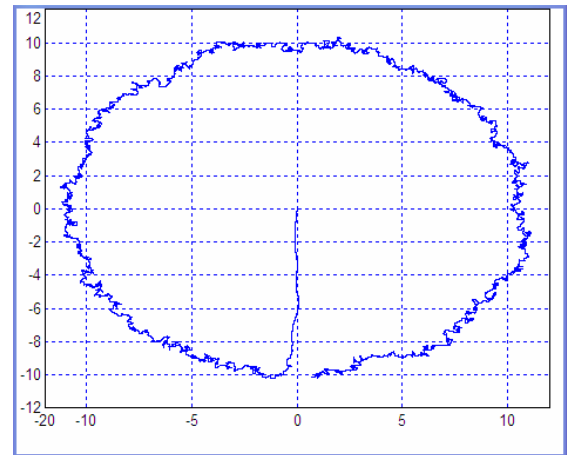


Рис. 12. То же, что на Рис. 11, при увеличении дисперсии гауссовых шумов вдвое

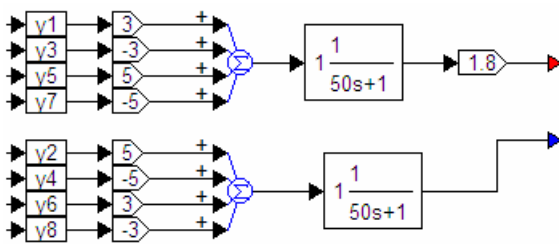


Рис. 10. Структура для моделирования действия фазометра по Рис. 2 (дополнительный фрагмент) – вместо структуры по Рис. 3 (добавлены фильтры НЧ в каждый канал)

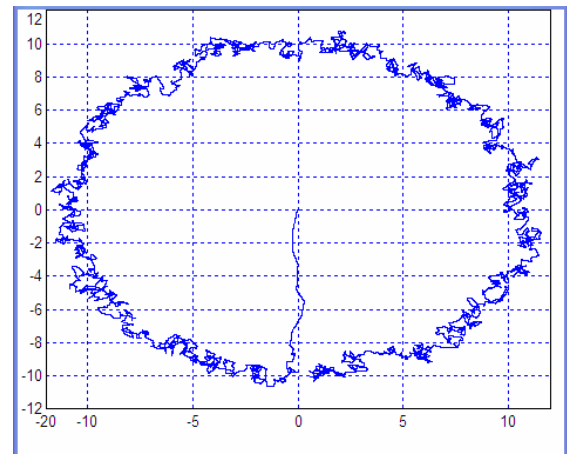


Рис. 13. То же, что на Рис. 11, при увеличении дисперсии гауссовых шумов вчетверо

Также исследовано влияние шумов при дальнейшем увеличении уровня этих шумов, как показано на Рис. 12–18.



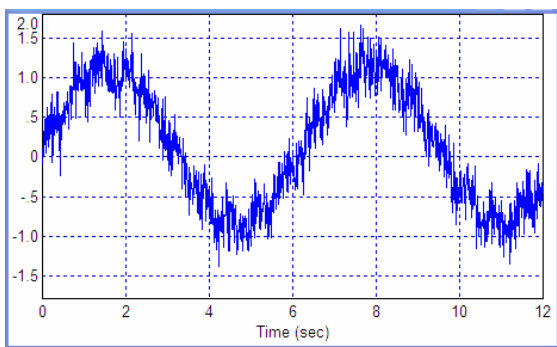


Рис. 14. Вид входного сигнала, при котором получены результаты определения фазы, показанные на Рис. 13 (среднеквадратичное значение гауссова шума равно 0.2)

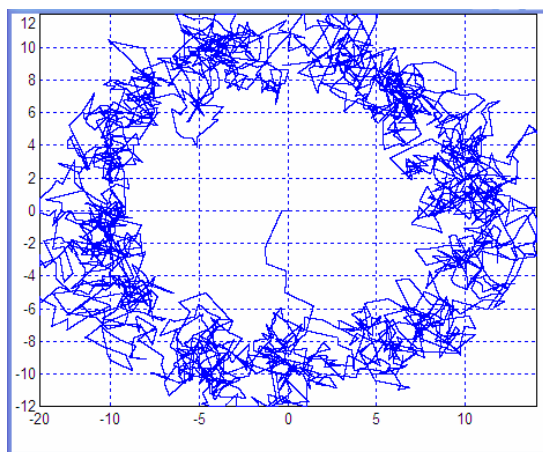


Рис. 17. То же, что на Рис. 11, при увеличении дисперсии гауссовых шумов в шестнадцать раз (среднеквадратичное значение гауссова шума равно 0.8)

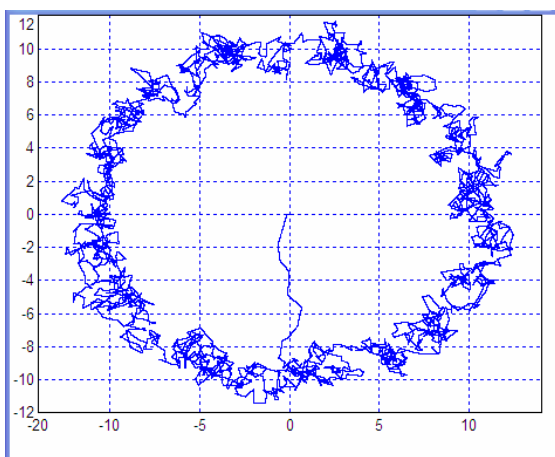


Рис. 15. То же, что на Рис. 11, при увеличении дисперсии гауссовых шумов в восемь раз (среднеквадратичное значение гауссова шума равно 0.4)

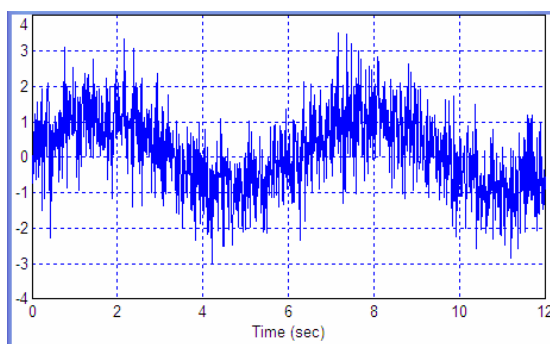


Рис. 18. Вид входного сигнала, при котором получены результаты определения фазы, показанные на Рис. 17 (среднеквадратичное значение гауссова шума равно 0.8)

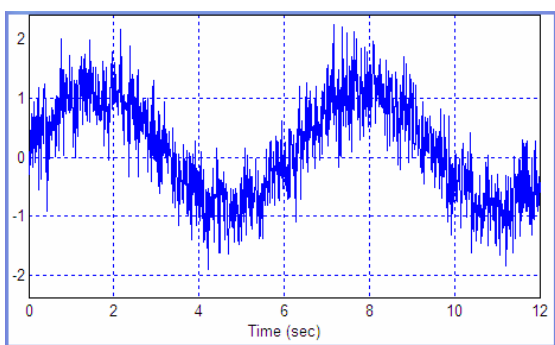


Рис. 16. Вид входного сигнала, при котором получены результаты определения фазы, показанные на Рис. 15 (среднеквадратичное значение гауссова шума равно 0.4)

Таким образом, моделированием в программе *VisSim* показана эффективность применения описанного метода обработки сигналов с целью извлечения информации о его фазе, а также с целью измерения разности фаз сигналов одной и той же частоты (путем использования двух рассмотренных каналов обработки и вычитания их результатов).

Показано, что метод обработки кардинально подавляет влияние постоянного смещения, существенно подавляет влияние модуляции, аддитивных гармонических помех и устойчив к воздействию высокочастотного гауссова шума. Сигнал, показанный на Рис. 18, принципиально непригоден для измерения фаз счетным способом. Сигнал, показанный на Рис. 9, также не пригоден без использования предварительной узкополосной фильтрации. Отметим, что в нашем случае фильтрация входного сигнала не используется вовсе, фильтрация результата обработки – это принципиально иной способ обработки, который относится к вторичной обработке, служит лишь для сглаживания получаемых результатов измерения фазы. Этот вид фильтрации не является необходимым, фазометр успешно работает и без нее, тогда как предварительная фильтрация сигнала при обработке счетным способом не только является необходимой, к ней к тому же предъявляются очень высокие требования (получаемое в результате отношение сигнал-шум должно быть весьма существенным для последующего формирования прямоугольных сигналов).

Также не следует путать предварительную фильтрацию с окончательной хотя бы по тому признаку, что предварительная фильтрация должна производиться в полосе исходного сигнала, то есть в данном случае в области частоты  $1\text{ МГц}$ , и она должна удалить шумы сигнала, а окончательная фильтрация применяется к полученному сигналу, отмечающему изменения фазы во времени, это низкочастотная фильтрация, ее полоса частот зависит от того, какие частотные девиации нас интересуют, а какие остаются вне нашего интереса.

Результат, показанный на Рис. 9, получен без какой-либо фильтрации вообще. Запас отношения сигнал-шум, как минимум, пятикратный. Сигнал, который при этом обрабатывался, также непригоден для использования счетного способа определения фазы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод потоковой обработки высокочастотных сигналов в данной статье детально исследован путем математического моделирования. Все сигналы приведены, также как показаны все структуры для моделирования, что позволяет убедиться в работоспособности и эффективности идеи любому читателю самостоятельно.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Л.В. Димитров. Повышение точности и надежности измерения разности фаз. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 1 (19). С. 83–97.
- [2] В.А. Жмудь, Д.О. Терешкин, А.В. Ляпидевский, А.В. Захаров, В.И. Голлобов. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент РФ на изобретение № 2497136. Зарегистрировано 27 октября 2013 г. Правообладатели: ОАО «НИПС» и ФГБОУ ВПО НГТУ. Сайт: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497136.html>
- [3] А.М. Гончаренко, В.А. Васильев, В.А.Жмудь. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Владельцы патента: Институт лазерной физики СО РАН. <http://www.findpatent.ru/patent/222/2225012.html>
- [4] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2012618604 DamMonitorNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012616410 от 27 июля 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2012 г.
- [5] В.А. Жмудь, А.В. Ляпидевский. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент РФ № 2551837. Патентообладатель: ОАО «Новосибирский институт программных систем». Заявка № 2013147228. Приоритет 22 октября 2013 г., зарегистрировано в госуд. реестре изобретений РФ 27 апреля 2015 г. Срок действия до 22 октября 2033 г.
- [6] Жмудь В.А., Воевода А.А., Семибаламут В.М., Гончаренко А.М., Бугров С.В. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент РФ 2470312. Заявка от 2010-09-28. Опубликовано 20.12.2012. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2470312>
- [7] V. A. Zhmud, D. O. Tereshkin, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 117–124.
- [8] V. A. Zhmud, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. The Problem of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements and its Decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.34–38.
- [9] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.43–46.
- [10] A.A.Voevoda, V.A.Zhmud, A.M.Goncharenko, V.I.Gololobov, A.V. Liapidevskiy. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. // Proceedings of the 18th IASTED International Conference “Applied Simulation and Modeling” (ASM 2009). Sept. 7-9, 2009. Palma de Mallorca, Spain. P.160 – 164.
- [11] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud’. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 162-166.
- [12] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud’. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346-351.
- [13] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud’ V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems // Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399 – 403.
- [14] Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M., Gololobov, V.I., Liapidevskiy, A.V. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 P.160 – 164.
- [15] V. A. Zhmud, D. O. Tereshkin, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 117–124.
- [16] V.A. Zhmud, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. The Problem of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements and its Decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd



Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.35–39.

- [17] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.44–47.
- [18] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Precision measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. 2002. Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering.
- [19] Semibalamut V.M., Fomin Yu. N., Timofeev V.Yu., Rybushkin A. Yu., Gribanova E.I., Kuznetsov S.Yu., Popov M.E., Sarycheva Y.K. Tidal parameters from results of laser deformographic measurements in the south-west part of the Baikal rift. Marees terrestres bulletin d'informations, Bruxelles, 10 octobre 1995, N123.
- [20] V.Yu. Timofeev, L.V. Anisimova, V.M. Semibalamut, A.Yu. Rybushkin, Yu.N. Fomin. Long-term crystal movements at south-west of the Baikal rift by tilt, strain and absolute laser gravity measurements. 29-th general assembly of IASPEI, Греция, Солоники, 18-28 августа 1997 г.
- [21] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.
- [22] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [23] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.1. // Научный вестник НГТУ. 2009. - N 4(37). С.25-32. ч.2.
- [24] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. // Научный вестник НГТУ. 2010. - N 1(38). С.35–74.
- [25] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book I. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: [www.sgem.org](http://www.sgem.org).
- [26] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book I. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P.

615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: [www.sgem.org](http://www.sgem.org).

## Additional Increase in the Accuracy of Measuring the Phase Difference by Secondary Synchronization of Samples of the Difference Frequency

VADIM ZHMUD,  
ALEKSANDR LIAPIDEVSKIY, LUBOMIR  
DIMITROV

*Abstract:* The relevance of measuring the phase differences of electrical signals for metrology is beyond of doubt. In the work [1] the method of forming of signals of a difference frequency with analog-digital converting of an analog harmonic signal is considered in details. It is shown using mathematical modeling in the VisSim program that if to obtain, for example, approximately four samples of the current frequency value, with further dividing of these samples into four separate sequences, then each such sequence will be a sequence of samples of the difference frequency, that is, a frequency equal to the difference between the frequency if the input signal and conversion frequency, divided by four. It is also shown that these samples can be used to form the coherent and quadrature components of the analytical signal, and it is shown how this aggregate analytical signal can be used to determine the phase or phase difference. However, paper [1] does not consider in detail how to bind the obtained samples to the same time moments. Indeed, the received samples are phase-shifted, which introduces an error in the measurement of the high-frequency components of phase additions. This paper offers and explores in detail the method of binding these samples to a single time scale. The technique is illustrated by signals obtained by mathematical modeling.

*Key words:* phase difference measurement, digital signal processing, simulation, phase meter, metrology, error, accuracy, measurement noise, modulation, offset, interference

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov. Povyshenie tochnosti i nadezhnosti izmereniya raznosti faz. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2017. № 1 (19). S. 83–97.
- [2] V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin, A.V. Ljapidevskij, A.V. Zaharov, V.I. Gololobov. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniem chastoty. Patent RF na izobretenie № 2497136. Zaregistrirovano 27 oktjabrja 2013 g. Pravoobladateli: OAO «NIPS» i FGBOU VPO NGTU. Sajt: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497136.html>
- [3] A.M. Goncharenko, V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud'. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniem chastoty. Patent RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Vladel'cy patenta: Institut lazernoj fiziki SO RAN. <http://www.findpatent.ru/patent/222/2225012.html>

- [4] Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeFM № 2012618604 DamMonitorNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Goncharenko A.M., Zhmud V.A. Zajavka № 2012616410 ot 27 ijulja 2012 g. Zaregistrirvano v Reestre programm dlja JeVM 21 sentjabrja 2012 g.
- [5] V.A. Zhmud, A.V. Ljapidevskij. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent RF № 2551837. Patentoobladatel': OAO «Novosibirskij institut programmyh sistem». Zajavka № 2013147228. Prioritet 22 oktjabrja 2013 g., zaregistrirvano v gosud. reestre izobretenij RF 27 aprelja 2015 g. Srok dejstvija do 22 oktjabrja 2033 g.
- [6] Zhmud V.A., Voevoda A.A., Semibalamut V.M., Goncharenko A.M., Bugrov S.V. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent RF 2470312. Zajavka ot 2010-09-28. Opublikovano 20.12.2012. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2470312>
- [7] V. A. Zhmud, D. O. Tereshkin, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 117–124.
- [8] V. A. Zhmud, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. The Problem of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements and its Decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.34–38.
- [9] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.43–46.
- [10] A.A.Voevoda, V.A.Zhmud, A.M.Goncharenko, V.I.Gololobov, A.V. Liapidevsky. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. // Proceedings of the 18th IASTED International Conference “Applied Simulation and Modeling” (ASM 2009). Sept. 7-9, 2009. Palma de Mallorca, Spain. P.160 – 164.
- [11] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud'. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 162-166.
- [12] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud'. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346-351.
- [13] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems // Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399 – 403.
- [14] Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M., Gololobov, V.I., Liapidevsky, A.V. The use of modelling for the speed precision phase meter metrological attestation under the condition of the absence of primary standard measuring devices. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 P.160 – 164.
- [15] V. A. Zhmud, D. O. Tereshkin, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. Precision fault-tolerant phase measurements for radio frequency and laser measurers of the super small displacements // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 117–124.
- [16] V.A. Zhmud, E.V. Prokhorenko, A.V. Liapidevskiy. The Problem of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements and its Decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.35–39.
- [17] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.44–47.
- [18] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Precision measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. 2002. Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering.
- [19] Semibalamut V.M., Fomin Yu. N., Timofeev V.Yu., Rybushkin A. Yu., Griбанова E.I., Kuznetsov S.Yu., Popov M.E., Sarycheva Y.K. Tidal parameters from results of laser deformographic measurements in the south-west part of the Baikal rift. Marees terrestres bulletin d'informations, Bruxelles, 10 octobre 1995, N123.
- [20] V.Yu. Timofeev, L.V. Anisimova, V.M. Semibalamut, A.Yu. Rybushkin, Yu.N. Fomin. Long-term crystal movements at south-west of the Baikal rift by tilt, strain and absolute laser gravity measurements. 29-th general assembly of IASPEL, Греция, Солоники, 18-28 августа 1997 г.
- [21] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics // Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.
- [22] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored “The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics”, 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [23] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.1. // Nauchnyj vestnik NGTU. 2009. - N 4(37). S.25-32. ch.2.
- [24] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. // Nauchnyj vestnik NGTU. 2010. - N 1(38). S.35–74.
- [25] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, Yu.N. Fomin. Optoelectronic intellectual systems for

monitoring of Earth seismic dynamics: results and developing directions. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P. 567–574. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: [www.sgem.org](http://www.sgem.org).

- [26] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, D.O. Tereshkin. Software structure for the laser sensor of the Earth crust Lunar-Solar tide deformations. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. Conference proceedings. Book 1. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Volume III. P. 615–622. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2016B13. URL: [www.sgem.org](http://www.sgem.org).



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
E-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)



**Ляпидевский Александр Валерьевич** – директор ОАО «НИПС». Область интересов: программные средства и системы, робототехника, автоматика.  
E-mail: [nips@nips.ru](mailto:nips@nips.ru)



**Любомир Ванков Димитров** – проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, профессор, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).  
E-mail: [lyubomir.dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lyubomir.dimitrov@tu-sofia.bg)