

**Выводы**

Результаты контроля амплитуды колебаний позволили создать ультразвуковую колебательную систему с максимальным коэффициентом преобразования электрической энергии в энергию ультразвуковых колебаний, максимальной равномерностью излучения вдоль всех полуволновых резонансных модулей, с интенсивностью излучения, достаточной для обеспечения кавитационного режима воздействия. Созданные излучатели позволили производить обработку жидких сред различной вязкости и дисперсного состава при решении задач диспергирования, эмульгирования, экстрагирования, очистки в химической, фармацевтической и пищевой промышленности.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Хмелёв, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелёв [и др.]. – Бийск: изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 196 С.
2. Ультразвуковой технологический аппарат «Булава» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ultrasonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_protocnoy\\_obraботki\\_zhidkikh\\_sred/apparat\\_ultrazvukovoy\\_protocnoy\\_serii\\_bulava\\_p\\_01/](http://www.ultrasonic.com/catalog/apparaty_dlya_protocnoy_obraботki_zhidkikh_sred/apparat_ultrazvukovoy_protocnoy_serii_bulava_p_01/).
3. Патент 2490607 Российская Федерация, МПК G01H9/00. Способ измерения амплитуды колебаний [Текст] / В.Н. Хмелёв, С.В. Левин, С.С. Хмелёв, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко; Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Центр ультразвуковых технологий Алт ГТУ". – №2012111358/28, заявл. 23.03.2012; опубл. 20.08.2013.
4. Хмелёв, В.Н. Стенд для контроля параметров пьезоэлектрических колебательных систем с многополуволновыми излучателями [Текст] / В.Н. Хмелёв [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – №2/1. – С. 151–154.
5. Патент 2473400 Российская Федерация, МПК B06B1/06. Ультразвуковая колебательная система [Текст] / В.Н. Хмелёв, С.В. Левин, С.С. Хмелёв, С.Н. Цыганок; Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Центр ультразвуковых технологий Алт ГТУ". – № 2011133763/28, заявл. 10.08.2011; опубл. 27.01.2013.
6. Khmelev, V.N. Efficiency increase of the processes by the optimization of the ultrasonic vibrating system consisting of half-wave modules of variable cross-section / Khmelev, V.N., Levin S.V., Khmelev S.S., Tsyganok S.N. // XII International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2011. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P. 275–280.

*Профессор, д.т.н., директор по науке Хмелёв В.Н. - vnh@bti.secna.ru; зам. директора по производству, Левин С.В. - lsv@bti.secna.ru; к.т.н., ведущий конструктор, Хмелёв С.С. - ssh@bti.secna.ru; к.т.н., директор по производству, Цыганок С.Н. - grey@bti.secna.ru – МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ».*

УДК 621.317.77

## ЦИФРОВОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ФАЗОМЕТР СИГНАЛОВ СВЧ ДИАПАЗОНА

А.А. Бардин, А.А. Орлов, Д.А. Станкевич

Описан аппаратно-программный комплекс, предназначенный для измерения угла фазового сдвига двух квазигармонических сигналов в диапазоне 35 МГц – 2,5 ГГц в режиме реального времени с относительной неопределенностью мгновенной частоты не более  $10^{-9}$  и неопределенностью угла фазового сдвига не более  $10^{-5}$  рад по выборкам не более  $10^5$  квазипериодов сигнала при глубине амплитудной и частотной модуляции до 20%.

**Ключевые слова:** мгновенная частота, угол фазового сдвига, фазометр, цифровой параметрический анализ, адаптивная фильтрация, радионавигация.

**Актуальность**

Фаза сигнала используется в большинстве радиотехнических систем в качестве информационного параметра, так как метод фазового кодирования является одним из самых помехоустойчивых [1]. Кроме того она является релятивистским инвариантом, что

делает этот параметр удобным при радиоизмерениях[2].

В настоящее время на смену аналоговым приходят цифровые фазометры, принципы работы которых основаны на измерении временных интервалов. Эти принципы не претерпели существенных изменений за последние десятилетия [3]. Улучшения точно-

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

сти достигнуты только за счёт развития элементной базы, ускорения процессов обработки данных, но методы построения изменяются мало. Следует отметить, что методы измерения фазового сдвига обычно основаны на представлении сигналов гармоническими функциями [4-5]. Такие методы не предусматривают работу с квазигармоническими сигналами, в которых изменяется частота и амплитуда. Это непосредственно влияет на точность измерения фазового сдвига. Для повышения точности алгоритм определения угла фазового сдвига должен оценивать изменяющуюся частоту и амплитуду сигнала. Это позволит адаптировать измерительную систему к работе с квазигармоническими сигналами.

### Алгоритм измерения угла фазового сдвига

В настоящее время существуют методы обработки квазигармонического сигнала вида

$$\operatorname{tg}(\varphi_0) \approx \frac{\sum_{n=4Q}^{N-1} |A_2[n]| \sqrt{4A_2^2[n] - A_1^2[n]} (A_1[n]A_3[n] - 2A_2[n]A_4[n])}{\sum_{n=4Q}^{N-1} (A_1[n]A_3[n] - 2A_2[n]A_4[n])^2},$$

здесь

$$\begin{aligned} A_1[n] &= x_1[n-4Q]x_2[n] - x_1[n]x_2[n-4Q], \\ A_2[n] &= x_1[n-3Q]x_2[n-Q] - x_1[n-Q]x_2[n-3Q], \\ A_3[n] &= x_1[n-3Q]x_2[n-Q] + x_1[n-Q]x_2[n-3Q], \\ A_4[n] &= x_1[n-Q]x_2[n-Q] + x_1[n-3Q]x_2[n-3Q], \\ x_i[n] &= x_i(t = \Delta n), \\ n &= 4Q, \dots, N-1. \end{aligned}$$

$N$  – длина окна,  $Q$  – параметр прореживания,  $\Delta$  – шаг дискретизации.

### Конструкция фазометра

Фазометр состоит из четырёх основных блоков: I – блок аналогового преобразования сигналов, II – блок оцифровки сигналов, III – блок обработки оцифрованных данных. Все три блока тактируются от одного опорного генератора входящего в состав блока IV. Структурная схема фазометра приведена, на рисунке 1.

Для измерения разности фаз СВЧ сигналы необходимо усилить и преобразовать так, чтобы на входе блока оцифровки их частота не превышала четверти частоты дискретизации аналого-цифрового преобразователя

где  $a(t)$  – медленно меняющаяся амплитуда,  $\omega(t) = d\theta(t)/dt$  – медленно меняющаяся мгновенная частота [6], позволяющие получить динамику мгновенной частоты, амплитуды и определить начальную фазу сигнала [7]. В разработанном фазометре реализован параметрический метод измерения угла фазового сдвига  $\varphi_0$  двух квазигармонических сигналов вида,

$$x_1(t) = a_1(t) \sin(\theta(t)),$$

$$x_2(t) = a_2(t) \sin(\theta(t) + \varphi_0),$$

по синхронным эквидистантным выборкам  $x_1[n]$ ,  $x_2[n]$  этих сигналов [8]. Конечное выражение для определения разности фаз по всем имеющимся данным имеет следующий вид:

(АЦП). Эту задачу выполняет блок аналоговой обработки СВЧ сигналов I, который состоит из двух идентичных каналов, каждый из которых содержит широкополосный усилитель (ШУ) 1, смеситель 2, фильтр нижних частот (ФНЧ) 3 и усилитель промежуточной частоты (УПЧ) 6. Частота гетеродина задается цифровым способом по средствам персонального компьютера 12. Гетеродин представляет собой генератор управляемый напряжением (ГУН) 4, синхронизированный по фазе с сигналом опорного генератора частоты системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) 5. Управление системой ФАПЧ и ГУН, а также получение данных с АЦП совмещённого в одном корпусе с термодатчиком 8, осуществляется микроконтроллером (МК) 7. Поступившие сигналы на вход фазометра после предварительного усиления двумя ШУ 1 поступают на вход активных смесителей AD8343 2 [9]. После фильтрации ФНЧ 3 и усиления УПЧ 6, сигнал промежуточной частоты по экранированным витым парам подается на вход блока оцифровки. Контроль температуры аналогового блока обработки

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2, 2014

сигналов I, а также управление частотой и фазовой манипуляцией сигнала гетеродина осуществляется МК 7. Для того, чтобы исключить взаимовлияние каналов первого

блока, входные каскады разнесены друг от друга и находятся в отдельных медных экранах, гетеродин равноудален от них и также помещен в экран из медной фольги.

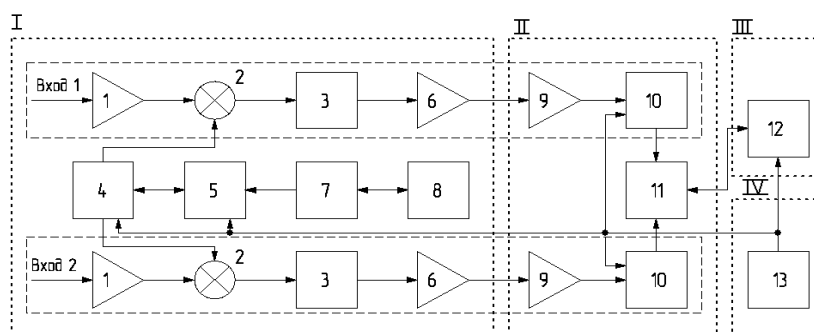


Рисунок - 1 Структурная схема цифрового фазометра: 1 – усилитель, 2 – смеситель, 3- фильтр нижних частот, 4 – генератор управляемый напряжением, 5 – система фазовой автоподстройки частоты, 6 – усилитель промежуточной частоты, 7 – микроконтроллер, 8 – низкочастотный аналого-цифровой преобразователь и термодатчик, 9 – усилитель, 10 – высокочастотный аналого-цифровой преобразователь, 11 – микроконтроллер, 12 – персональный компьютер, 13 – опорный генератор.

Усиленные сигналы с выхода блока I поступают на вход блока оцифровки II. В этом блоке они усиливаются в 5 раз предусилителем 9 типа LTC6406 фирмы LinearTechnology, который представляет собой малошумящий низковольтный дифференциальный усилитель с полосой до 800 МГц [10] и после этого поступают на входы высокочастотного АЦП 10. По завершению преобразования АЦП 10 выставляет данные на выходах по спаду сигнала. После этого логический элемент обеспечивает синхронный захват данных с обоих АЦП микроконтроллером 11. Термостатирование блока оцифровки II реализовано помещением монтажной платы в ёмкость, наполненную синтетическим машинным маслом. В качестве контроллера интерфейса USB 3.0 11, использовалась отладочная плата CYUSB3KIT-001 [11] 32-х разрядного микропроцессора CYUSB3014. Затем обработанные данные по шине USB 3.0 поступают на вход персонального компьютера (ПК) 12. Поскольку оцифрованные данные перед передачей в ПК 12 не требуются предварительно обрабатывать, пересылка данных осуществляется посредством механизма прямого доступа к памяти. Получаемые данные разбиваются на блоки, обработка которых за счёт использования многопроцессорной системы идёт в параллельном режиме. Первым этапом обработки данных является цифровая фильтрация. При реализации цифрового фильтра используется метод частотной выборки [12]. Он применяется для создания уз-

копосных фильтров с конечной длиной импульсной характеристики и линейной ФЧХ. Рекурсивный алгоритм реализации фильтра позволяет достичь более высокого быстродействия по сравнению с фильтрами, основанными на свёртке сигнала с импульсной характеристикой фильтра. Тактирование всего фазометра производится от опорного генератора 13, в качестве которого используется либо кварцевый термостатированный генератор, либо квантовый стандарт частоты [13].

#### Поверка фазометра

Пределы точности проведённых измерений выходят за диапазоны существующих поверочных схем, включая разрабатываемый в настоящее время проект ГОСТ Р «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений угла фазового сдвига в коаксиальных волноводах в диапазоне частот от 0,001 до 65 ГГц» [14]. Поэтому метрологические характеристики разработанной установки оценивались путем косвенных измерений с помощью специально разработанных технических и программных средств. Для оценки погрешности измерения разности фаз между двумя сигналами на входы фазометра подавался один и тот же сигнал. На рисунке 2 представлена зависимость дисперсии Аллана [15] фазового сдвига от времени усреднения, из которой можно сделать вывод о том, что разность фаз носит в основном шумовой характер. При времени усреднения 20 мс погрешность измерения фазового сдвига со-

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

ставляет  $3 \cdot 10^{-4}$  рад, что при частоте сигнала  $f = 1600$  МГц соответствует временной за-

держке  $\tau = 30$  фс.

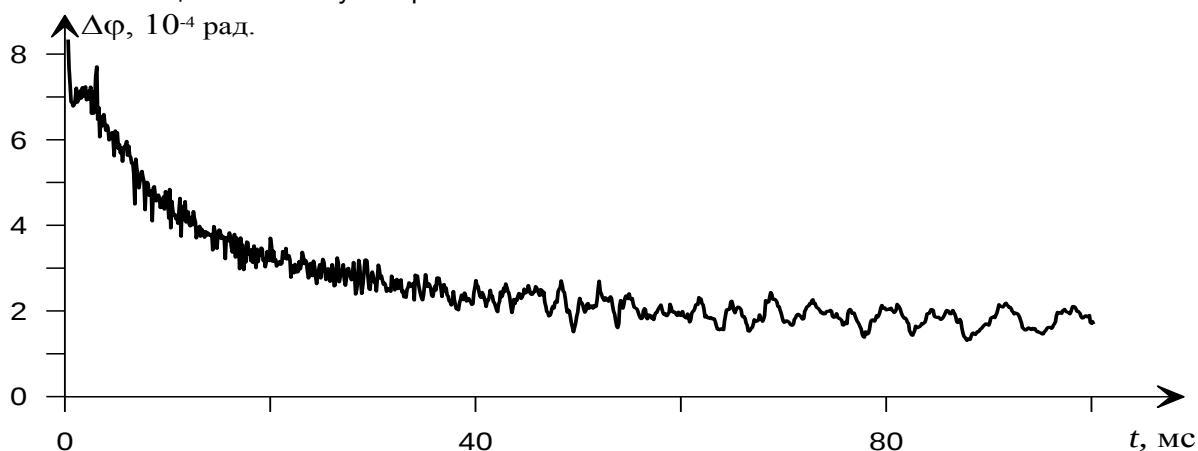


Рисунок 2 – Зависимость дисперсии Аллана разности фаз от времени усреднения

### Выводы

Разработанный цифровой параметрический фазометр обладает погрешностью измерения фазового сдвига СВЧ сигналов составляющую  $3 \cdot 10^{-4}$  рад за время измерения 20 мс на частоте 1600 МГц. Использование предложенного фазометра в системах фазовой пеленгации и определения ориентации позволит получить точностью определения угла между направляющим базисом антенной пары и направлением на источник сигнала порядка  $10^{-5}$  рад при длине базы менее 1 м [16].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника. [Текст] / В. И. Тихонов - М.: Советское радио. 1982. – 624 с.
2. Островский, Л. А. Введение в теорию модулированных волн. [Текст] / Л.А. Островский, А.И. Потапов - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 400 с.
3. Чмых, М.К. Цифровая фазометрия. [Текст] / М.К. Чмых - М.: Радио и связь, 1993. - 184 с.
4. Смирнов, В. Н. Широкополосный цифровой фазометр [Текст] / В.Н. Смирнов, М.В. Кучеров // Вопросы радиоэлектроники. 2004.- № 1. - С. 33-41.
5. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов [Текст] / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.А. Миронов // Ползуновский вестник. - 2013 - №. 2 - С. 198-201.
6. ГОСТ 8.567-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение времени и частоты. Термины и определения. Введ. 01.01.2001. М.: Изд-во стандартов, 2000. –11 с.
7. Боровков, В. И. Однозначное определение огибающей и мгновенной частоты электромагнитических колебаний [Текст] / В.И. Боровков, В.К. Игнатьев, А.В. Никитин, С.В.Юшанов // Изве-

стия вузов. Электромеханика. 2012. № 1. С. 16-20.

8. Игнатьев, В.К. Измерение разности фаз квазигармонических сигналов в реальном времени [Текст] / В.К. Игнатьев [и др.] // Наука и образование. 2013. № 7. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/file/out/608930>, свободный. Загл. с экрана.
9. Техническое описание микросхемы AD8343 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8343.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8343.pdf). Загл. с экрана.
10. Техническое описание микросхемы LTC2203 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.linear.com/docs/9678](http://www.linear.com/docs/9678). Загл. с экрана.
11. Техническое описание отладочной платы CYUSB3KIT-001 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cypress.com/?rID=58321>. Загл. с экрана.
12. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов. [Текст] / Л. Рабинер, Б. Гоулд – М.: Мир. - 1978. - 848 с.
13. Техническое описание квантового стандарта частоты [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.guidospeer.de/Pub/Images/Rubidium/5680\\_TECH\\_MANUAL.pdf](http://www.guidospeer.de/Pub/Images/Rubidium/5680_TECH_MANUAL.pdf). Загл. с экрана.
14. МИ 2139-91 Государственная поверочная схема для средств измерений угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями в коаксиальных трактах в диапазоне частот 0,001 – 17,4 ГГц: Рекомендация: Введ. 01.01.92.
15. Allan, D.W. «Statistics of Atomic Frequency Standard», Proceedings of the IEEE, v.54, No. 2, pp.221 – 231 (1966).
16. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования [Текст]/ Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника.- 2010. - 800 с.

аспиранты: Бардин А. А., Орлов А. А., ассистент Станкевич Д.А., тел. (8442) 46-08-10. E-mail: [alebar13@yandex.ru](mailto:alebar13@yandex.ru) - кафедра радиофизики, Волгоградский Государственный Университет