

Таким образом, в результате исследования, были достигнуты следующие результаты.

1. Проведен анализ существующих способов тактовой синхронизации без внесения избыточности в сигнал.

2. Разработан алгоритм тактовой синхронизации, требующий в среднем две операции умножения и три операции сложения на каждый отсчет цифрового сигнала и способный работать при рассогласовании тактовых частот порядка  $1 \cdot 10^{-4}$ .

#### Библиографические ссылки

1. Жидяев А. В., Мошонкин В. А., Копысов А. Н. Разработка и исследование алгоритмов адаптации коротковол-

Получено 05.05.2016

новой радиолнии // Измерения, контроль и диагностика – 2014 : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Ижевск, 2014. – С. 188–194.

2. Marvin K. Simon. Bandwidth – Efficient Digital Modulation with Application to Deep-Space Communications. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2001.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М. : Вильямс, 2003.

4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М. : Радио и связь, 1985.

5. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М. : Радио и связь, 2000.

УДК 621.391

**В. А. Пономарев**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**О. В. Пономарева**, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**А. В. Пономарев**, кандидат экономических наук, Администрация Главы и Правительства Удмуртской Республики

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРОВ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ НА КОНЕЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ) занимает важное место в теории спектрального анализа дискретных информационных сигналов (ДИС) [1–3]. ДВПФ некоторой последовательности  $y(n)$ ,  $n = -\infty, +\infty$ , определяется как ее  $z$ -преобразование на единичной окружности:

$$S_y(f) = S_y(z) \Big|_{z=\exp(-j2\pi f)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n) \cdot \exp(-j2\pi \cdot f \cdot n), \quad -1/2 \leq f \leq 1/2. \quad (1)$$

Таким образом, ДВПФ некоторой дискретной последовательности  $y(n)$ ,  $n = -\infty, +\infty$ , ставит в соответствие ей *непрерывный периодический спектр*  $S_y(f)$ .

Если взвесить исходный ДИС  $x(n)$  прямоугольным временным окном  $\omega_B(n)$  ( $\omega_B(n) = 1$  при  $n = \overline{0, (N-1)}$ ;  $\omega_B(n) = 0$  при  $n = -\infty, (-1)$  и при  $n = \overline{N, +\infty}$ ), то получим *взвешенное ДВПФ*.

Теория ДПФ [4–25] базируется на трех основных и взаимосвязанных положениях: определение сигнала на конечном интервале ( $N$ -интервале), определение сдвига сигнала как некоторой перестановки его отсчетов и определении базиса в виде полной системы дискретных базисных функций.

Прямое ДПФ:

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}; \quad (2)$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N), \quad k = \overline{0, (N-1)}.$$

Обратное ДПФ:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_N(k) W_N^{-kn}; \quad (3)$$

$$W_N = \exp(-j2\pi/N), \quad n = \overline{0, (N-1)}.$$

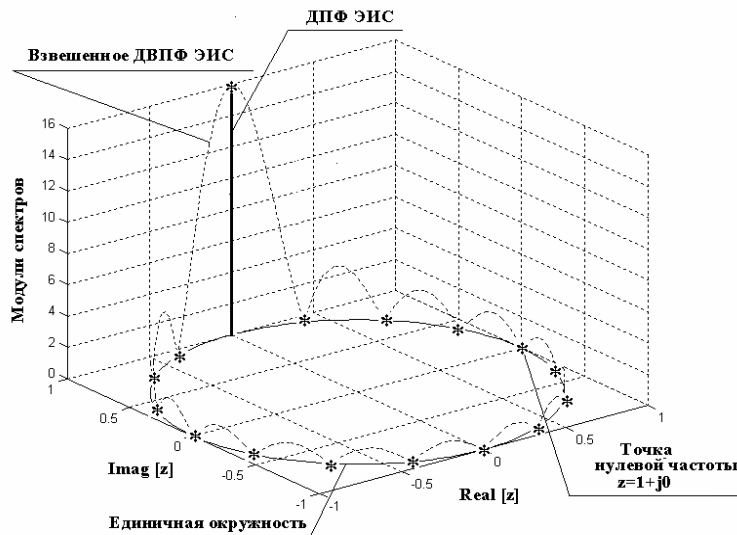
Сопоставляя соотношения (1) и (2), несложно установить, что коэффициенты ДПФ  $S_N(k)$  равны значениям взвешенного ДВПФ в точках  $2\pi k/N$ ,  $k = \overline{0, N-1}$  на единичной окружности (рис. 1) *периодической последовательности*  $x_p(n)$ ,  $n = \overline{0, (N-1)}$ , определяемой циклической перестановкой отсчетов последовательности  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , внутри  $N$ -интервала.

При практическом применении ДПФ возникает ряд проблем, появление которых связано с проявлением специфических эффектов, сопровождающих его использование [14]. Отметим главный из них – *эффект частоты в частотной области*, суть которого заключается в том, что ДПФ не дает ответа

на вопрос: каковы значения спектра, определяемого взвешенным ДВПФ, между отсчетами  $2\pi k/N$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , на единичной окружности?

Для определения значений спектра между отсчетами  $2\pi k/N$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , в теории спектрального

анализа сигналов применяется процедура *искусственного увеличения интервала определения*  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , за счет добавления нулевых отсчетов во временной области [1] – *операция дополнения нулями во временной области (ОДНВ)*.



Сигнал  $x(n) = \exp((j2\pi/N) \cdot k \cdot n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ ,  $N = 16$ ,  $k = 4$ ; взвешенное ДВПР сигнала  $x(n)$  обозначено пунктирной линией, значения ДПФ сигнала обозначены звездочками \*;  $z = 2\pi/N$

Введем в теорию спектрального анализа на конечных интервалах новую форму преобразования Фурье – *дискретно-частотное преобразование Фурье (ДЧПФ)*.

Пусть задана в частотной области некоторая последовательность  $S(k)$ ,  $k = \overline{-\infty, +\infty}$ , ДЧПФ которой определим следующим образом:

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S(k) \cdot \exp(+j2\pi \cdot k \cdot t), \quad (4)$$

где  $-1/2 \leq t < +1/2$ .

Соотношением (4) определяется *непрерывный периодический сигнал*, соответствующий дискретной последовательности  $S(k)$ ,  $k = \overline{-\infty, +\infty}$ .

Если *взвесить* последовательность  $S(k)$ ,  $k = \overline{-\infty, +\infty}$ , прямоугольным частотным окном  $\omega_x(k)$ , ( $\omega_x(k) = 1$  при  $k = \overline{0, (N-1)}$ ;  $\omega_x(k) = 0$  при

$k = \overline{-\infty, (-1)}$  и при  $k = \overline{N, +\infty}$ ), то получим *взвешенное ДЧПФ*.

Сопоставляя соотношения (4) и (3), несложно установить, что коэффициенты обратного ДПФ  $x(n)$  равны значениям взвешенного ДЧПФ в точках  $n = \overline{0, N-1}$  *периодической последовательности*  $S_N(k)$ ,  $k = \overline{0, (N-1)}$ , определяемой циклической перестановкой отсчетов последовательности  $S_N(k)$ ,  $k = \overline{0, (N-1)}$ , внутри  $N$ -интервала. Таким образом, обратное ДПФ не дает ответа на вопрос, каковы значения сигнала, определяемого взвешенным ДЧПФ, между отсчетами  $n = \overline{0, N-1}$ ? И мы при практическом применении обратного ДПФ сталкиваемся с *эффектом частоты во временной области*.

Используя понятие временного спектра,<sup>1</sup> несложно установить, что исходный ДИС  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$  является *только одним из воз-*

<sup>1</sup> Представление сигнала в виде спектра может быть применено не только для представления сигналов в частотной области, но и для представления сигналов во временной области. В этом случае сигнал во временной области интерпретируется как *временной спектр* – результат разложения сигнала по системам единичных импульсов или дельта-функций Дирака (Трахтман А. М. Введение в обобщенную спектральную теорию. М. : Сов. радио. 1972. 352 с.). Дискретный информационный сигнал  $x(n)$ ;  $n = \overline{-\infty, +\infty}$ , полученный путем дискретизации некоторого непрерывного сигнала  $x(t)$ ;  $-\infty \leq t \leq \infty$ , также можно считать *дискретным временным спектром* – результатом разложения по системе дискретных единичных импульсных функций (функций единичного отсчета):

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k) \cdot \delta(n-k); \quad \text{где } \delta(n) = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0 \\ 0 & \text{при } n \neq 0 \end{cases} \text{ – функция единичного отсчета.}$$

возможных временных спектров дискретного измерительного сигнала  $x(n)$ .

Для определения значений временного спектра, задаваемого ДЧПФ взвешенной последовательности  $S_N(k)$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , в промежутках между значениями  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , можно применить **искусственное увеличение интервала определения**  $S_N(k)$ ,  $k = \overline{0, N-1}$ , за счет добавления нулевых отсчетов в частотной области [17] (**операция дополнения нулями в частотной области (ОДНЧ)**). Данная операция уменьшает влияние **эффекта частоты во временной области** на результаты дискретных измерений временных спектров и позволяет за счет **уменьшения шага дискретизации во времени** измерять временные спектры, задаваемые взвешенным ДЧПФ [10].

Однако ОДНЧ, аналогично ОДНВ, имеет следующие существенные недостатки, которые проявляются при реализации ОДНЧ процессорными измерительными средствами (ПриС): необходимость существенного расширения оперативной памяти ПриС для хранения нулевых значений спектра; проведение непроводительных вычислений ПриС с нулевыми значениями спектра; уменьшение шага дискретизации временного спектра при ОДНЧ может быть проведено только в число раз, равное двум в целой степени.

В работах [7, 8, 10, 13] предложены эффективные методы измерения ДЧПФ на основе разработанных авторами быстрых алгоритмов модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье. Предложенные быстрые алгоритмы позволяют избежать операций с нулевыми отсчетами, а также уменьшить шаг дискретизации временного спектра в произвольное целое число раз.

В заключение отметим некоторые предметные области приложений методов измерения ДЧПФ, разработанных авторами: акустика, дефектоскопия, теория информации, теория кодирования, геофизика, спектроскопия, космические исследования, исследования поведения зданий и сооружений при землетрясениях, виброакустическое функциональное диагностирование механических объектов, компьютерная медицинская диагностика, пассивная и активная гидроакустика.

#### Библиографические ссылки

1. Пономарева О. В., Пономарев А. В. Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3(67). – С. 88–91.
2. Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарев А. В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 31–38.
3. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев,

Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

4. Пономарева О. В. Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.

5. Пономарева О. В., Пономарев В. А., Пономарев А. В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2–8.

6. Пономарева О. В. Инвариантность скользящего энергетического спектра Фурье дискретных сигналов в базисной системе параметрических экспоненциальных функций // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 102–106.

7. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом аperiодического дискретного преобразования Фурье // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 106–109.

8. Пономарева О. В. Измерение спектров комплексных сигналов на конечных интервалах методом аperiодического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 100–107.

9. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 126–132.

10. Пономарева О. В. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 132–138.

11. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах // Известия высших учебных заведений России. – Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 2. – С. 8–16.

12. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Инвариантность текущего энергетического фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–22.

13. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарева Н. В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10–15.

14. Пономарева О. В., Алексеев В. А., Пономарев А. В. Цифровой периодограмм-анализ и проблемы его практического применения // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 2(58). – С. 130–133.

15. Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А. Обобщение алгоритма Герцеля для решения задач выявления скрытых периодичностей // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 41–46.

16. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 114–119.

17. Пономарева О. В. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

18. Пономарева О. В., Пономарева Н. В. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми

периодичностями // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2(20). – С. 122–129.

19. Пономарева О. В. Вероятностные свойства спектральных оценок, полученных методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 36–41.

20. Алексеев В. А., Пономарев В. А., Пономарева О. В. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 91–99.

21. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Модификация дискретного преобразования Фурье для решения задач интерполяции и свертки функций // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 8. – С. 1561–1570.

Получено 21.03.2016

22. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Временные окна при оценке энергетических спектров методом параметрического дискретного преобразования Фурье // Автометрия. – 1983. – № 4. – С. 39–45.

23. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Обобщение дискретного преобразования Фурье для интерполяции во временной области // Известия вузов. – Радиоэлектроника. – 1983. – Т. XXVI, № 9. – С. 67–68.

24. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Виброакустическое диагностирование коробок передач станков цифровыми методами // СТИН. – 1983. – № 9. – С. 18–21.

25. Пономарев В. А., Тимохин В. И. Применение временных окон в цифровом спектральном анализе случайных сигналов // 7-й Всес. симпозиум «Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». – ВНИИЭП, 1974. – С. 93–96.

УДК 681.3:622.24

**В. Е. Лялин**, доктор технических наук, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

**А. Н. Краснов**, кандидат технических наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет

## ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В СКВАЖИНЕ ОДНИМ ДАТЧИКОМ ПО ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Известны способы и устройства для дистанционного измерения давления [1] и температуры [2], использующие четырехпроводную линию связи. Однако невозможность внесения поправки на изменение температуры при изменении давления [3] снижает точность измерения давления, так как не известна температура самого тензопреобразователя, а при измерении температуры скважинным дистанционным термометром [4] необходимы два датчика температуры, что усложняет устройство.

Известен способ измерения давления и температуры в скважине одним датчиком (тензомостом) [5], включающий подачу тока на датчик, измерение напряжений, по которым определяют значения измеряемых параметров.

Известное устройство для измерения давления и температуры, выбранное в качестве прототипа [6], содержит мостовой тензопреобразователь давления (тензомост), четырехпроводную линию связи (трехжильный геофизический кабель), три источника тока.

Недостатком известного способа и устройства является наличие трех источников тока, что усложняет устройство и, кроме того, создает трудности получения одинаковых токов, наличие шести нелинейных ключевых элементов (диодов), включенных в измерительную цепь, и подбор их попарно с одинаковыми вольт-амперными характеристиками также представляет значительную сложность и увеличивает дополнительную погрешность при изменении их температуры, что снижает точность измерения напряжения на выходах источника тока. Кроме того,

в производственных условиях невозможно включить диоды в разрыв плеч тензомоста. Это может сделать только завод – изготовитель датчиков.

Подгонка сопротивления линии связи к одинаковому значению между собой вызывает определенную трудность и при изменении температуры приводит к появлению дополнительной погрешности за счет разного количества меди в проводах.

Цель изобретения – повышение точности способа и упрощение устройства измерения за счет использования стандартного мостового датчика (без переделки), повышения чувствительности по напряжению, исключения нелинейных ключевых элементов (диодов) из измерительной цепи, устранения влияния сопротивления проводов линии связи. Использование брони в данном случае не приводит к уменьшению точности измерения.

Сущность изобретения заключается в том, что в способе измерения давления и температуры одним датчиком, включающим подачу тока на диагональ питания стандартного тензомостового датчика и измерение напряжения на магистральной диагонали  $U_1$ , согласно изобретению при смене направления тока питания тензомоста совмещают питающую и измерительную диагонали и измеряют напряжение  $U_2$ , а значения давления и температуры определяют из соотношений

$$P = K_P \Delta R_P = U_1 / I;$$

$$T = K_T \Delta R_T = \frac{U_2 - U_0}{I},$$