

УДК 004.67:621.3.088

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРТЛИ

А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, Р. И. ВОРОБЕЙ, О. К. ГУСЕВ, А. Л. ЖАРИН, А. Д. ПОВЕДАЙКО, К. Л. ТЯВЛОВСКИЙ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 004.67:621.3.088

DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR SCANNING KELVIN PROBE USING FAST HARTLEY TRANSFORM

A. K. TYAVLOVSKY, R. I. VOROBAY, O. K. GUSEV, A. L. ZHARIN, A. D. POVEDAYKO, K. L. TYAVLOVSKY

Аннотация. Для реализации измерений контактной разности потенциалов с использованием цифрового зонда Кельвина в реальном масштабе времени предложено использовать обработку сигнала на основе быстрого преобразования Хартли. В рамках проведенного исследования была создана программная реализация быстрого преобразования Хартли на базе микроконтроллера Atmel Mega 2560. Разработанные алгоритмы и программы обеспечивают дополнительное подавление шумов и паразитных гармоник сигнала, существенное повышение точности определения параметров компенсационной зависимости цифрового зонда Кельвина и, соответственно, точности измерений в целом.

Ключевые слова: сканирующий зонд Кельвина, микроконтроллер, быстрое преобразование Хартли, алгоритм, зондовая электрометрия.

Abstract. Signal processing based on the fast Hartley transform is proposed to implement real-time measurements of the contact potential difference using a digital Kelvin probe. Software implementation of the fast Hartley transform was developed using the Atmel Mega 2560 microcontroller as a basis. The developed algorithms and programs provide additional suppression of noise and parasitic signal harmonics that leads to significant increase in the accuracy of determining the parameters of the of the digital Kelvin probe compensation curve therefore improving the overall measurement accuracy.

Key words: scanning Kelvin probe, microcontroller, fast Hartley transform, algorithm, probe electrometry.

Недостатком традиционного вибрирующего электрометрического зонда Кельвина, реализующего компенсационную схему измерения контактной разности потенциалов (КРП), является низкое быстродействие (большое время установления выходного сигнала), обусловленное инерционностью интегрирующего звена в цепи компенсационной обратной связи, что ограничивает скорость сканирования при картировании поверхности образца таким зондом. Для решения указанной проблемы в конструкции разработанного в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ

измерительного преобразователя был реализован оригинальный метод измерений с неполной компенсацией сигнала [1], обеспечивающий кратное сокращение времени единичного измерения, но требующий использования вычислительных микроконтроллерных средств для определения результата измерения.

Измерительный сигнал малогабаритного вибрирующего зонда Кельвина имеет сложную форму и спектральный состав, что обусловлено нелинейностью системы «вибрирующий зонд – образец» [2]. В связи с этим для выделения информативных параметров сигнала и вычисления значений измеряемой величины КРП необходимо выполнить вычисление основных гармонических составляющих измерительного сигнала, причем такие вычисления должны выполняться в реальном масштабе времени. Это накладывает жесткие ограничения на быстродействие применяемых вычислительных средств и алгоритмов.

Из числа цифровых методов определения спектрального состава сигнала наибольшее распространение получил метод на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ). БПФ отображает вещественные функции в комплексную область и при этом является несимметричным по комплексной переменной, что усложняет его программную реализацию и замедляет выполнение расчетов с использованием микроконтроллера. Преобразование Хартли является аналогом преобразования Фурье и может применяться для спектрального анализа, фильтрации и обработки сигналов [3]. В отличие от преобразования Фурье преобразование Хартли осуществляет преобразования только в вещественной области, отображая вещественные сигналы $s(t)$ в вещественные $Sh(\omega)$. Преобразование Хартли задается выражениями

$$Sh(\omega) = (1 / \sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \text{cas } \omega t dt, \quad (1)$$

$$s(t) = (1 / \sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} Sh(\omega) \text{cas } \omega t dt, \quad (2)$$

где cas – сумма косинуса и синуса одного аргумента,

$$\text{cas } \omega t = \cos \omega t + \sin \omega t. \quad (3)$$

Множители $1/\sqrt{2\pi}$ обусловлены применением в формулах аргумента ω . Они могут заменяться одним множителем $1/2\pi$ только в (2), но это нарушает симметричность прямого и обратного преобразования. При необходимости применения симметричных алгоритмов в формулах можно использовать аргумент циклической частоты:

$$Sh(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \text{cas } 2\pi f t dt,$$

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Sh(\omega) \text{cas } 2\pi f t df.$$

Прямое и обратное преобразование Хартли взаимно симметричны. Преобразования Фурье и Хартли связаны соотношениями

$$S(f) = Sh_{sym}(f) - jSh_{asym}(f), \quad (4)$$

$$Sh(f) = A(f) - B(f), \quad (5)$$

где $A(f)$ – четная вещественная часть спектра Фурье; $B(f)$ – нечетная мнимая часть спектра Фурье.

Таким образом, преобразование Фурье равно разности четной составляющей преобразования Хартли и нечетной составляющей, умноженной на j , а преобразование Хартли определяется как разность вещественной и мнимой составляющих преобразования Фурье.

Алгоритм быстрого преобразования Хартли аналогичен алгоритму БПФ, хотя в этом случае обработка данных производится в другом порядке [4]. Общая формула разложения Хартли для алгоритма быстрого преобразования имеет следующий вид:

$$X(k) = X_{a1}(k) + X_{a2}(k) \cos 2\pi k / n + X_{a2}(N - k) \sin 2\pi k / N, \quad (6)$$

где $X_{a1}(k)$ и $X_{a2}(k)$ соответственно равны $\frac{1}{2}\{\alpha_1\beta_1\gamma_1\dots\alpha_1\beta_1\gamma_1\dots\}$ и $\frac{1}{2}\{\alpha_2\beta_2\gamma_2\dots\alpha_2\beta_2\gamma_2\dots\}$.

Преобразование Хартли оказывается более экономным по времени, так как все операции с вещественными числами как при прямом, так и при обратном преобразованиях, выполняемых единообразно, производятся несколько быстрее, чем при преобразовании Фурье. Экономия времени обработки информации получается и благодаря особому построению представленного на рис. 1 алгоритма быстрого преобразования. При выполнении первых двух этапов, следующих за операцией перестановки, косинусные и синусные множители в формуле (6) принимают только значения или 1, или -1. Передача сигналов, показанная для этих этапов на рис. 1 сплошными линиями, производится без их изменения, а передача сигналов, показанная прерывистыми линиями, с их инвертированием. На следующем этапе приведенного на рис. 1 преобразования двум третям ветвей отвечают косинусные и синусные множители, часть которых также равна 0 или 1, или -1.

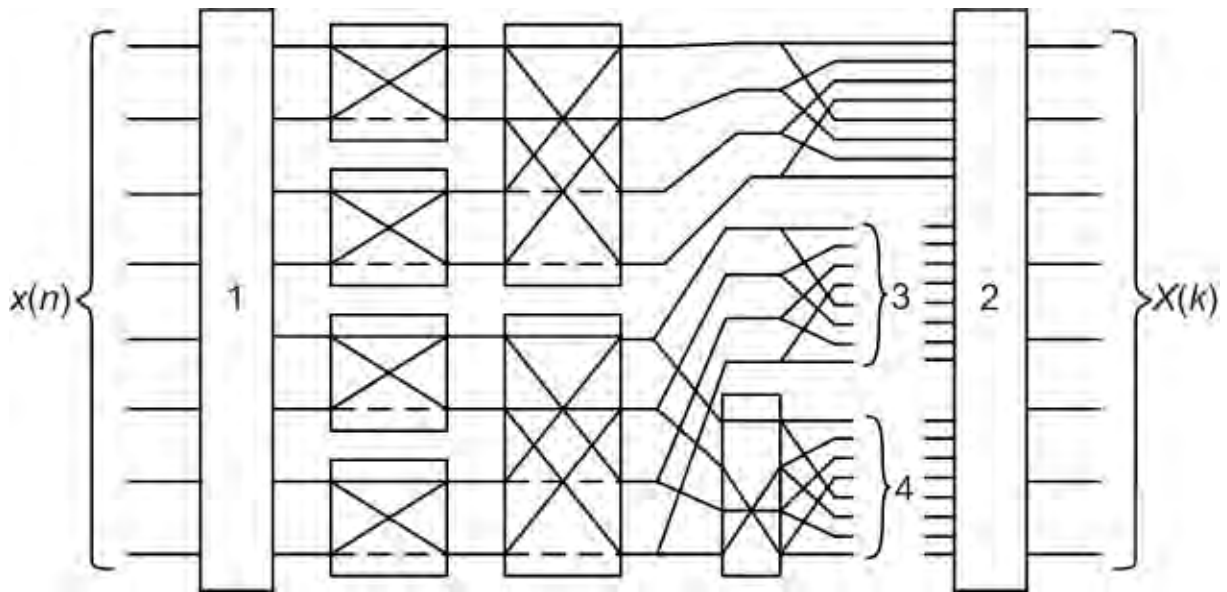


Рис. 1. Схема выполнения быстрого преобразования Хартли для восьмиточечной последовательности: 1 – операция перестановки; 2 – операция объединения; 3 – линии передачи сигналов C_m при $0 \leq m \leq 7$; 4 – линии передачи сигналов S_m при указанных выше значениях m (обозначения C_m и S_m приняты соответственно для $\cos(2\pi m/L^2)$ и $\sin(2\pi m/L^2)$, где L – номер шага преобразования)

В рамках проведенного исследования была создана программная реализация быстрого преобразования Хартли для сигнала цифрового электрометрического зонда Кельвина на базе микроконтроллера Atmel Mega 2560. Обработываемые данные (отсчеты измерительного сигнала) имеют 16-битный формат, являясь числом с фиксированной точкой. Это обеспечивает на низких частотах порог шума около -78 дБ.

В каждом вычислении выражения (6) необходимо умножить множество исходных значений на синусные и косинусные константы. В случае Atmel Mega 2560 для этого требуются большие вычислительные ресурсы, поскольку умножение 16 бит на 16 бит требует 18 тактовых циклов. С другой стороны, сложение 16 бит и 16 бит требует только два тактовых цикла. Поскольку синусные и косинусные константы, используемые в быстром преобразовании Хартли – это просто 0 и 1, то операция умножения оказывается необязательной и может быть заменена сложением. К примеру, для получения 256 выходных отсчетов требуется выполнить 1024 сложных умножения, из которых 382 – это умножения на 0 или 1. Для автоматического поиска условий, использующих множители 0 и 1, в разработанном программном обеспечении использованы средства библиотеки Arduino FHT [5]. При использовании данной библиотеки общее количество операций умножения для получения N выходных отсчетов преобразования Хартли составляет $(N/2) \cdot \log_2(N)$, что обеспечивает существенное повышение быстродействия и позволяет выполнять измерения в реальном масштабе времени.

Результаты разработки обеспечили цифровому электрометрическому зонду возможность получения полных характеристик сигнала в реальном масштабе времени, что может быть использовано для дополнительного подавления шумов и паразитных гармоник сигнала, а также для статистического вычисления амплитуды сигнала. Тем самым обеспечивается существенное повышение точности определения параметров компенсационной зависимости и, соответственно, точности измерения контактной разности потенциалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pantsialeyeu, K. U.** Dig-ital contact potential difference probe [Electronic resource] / K. U. Pantsialeyeu, A. I. Svistun, A. K. Tyavlovsky, A. L. Zharin // Dig-ital Devices and Methods of Measurements. – 2016; 7(2):136-144. (In Russ.) – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144>.

2. **Pantsialeyeu, K. U.** Design of the contact potentials difference probes [Electronic resource] / K. U. Pantsialeyeu, U. A. Mikitsevich, A. L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2016; 7(1):7-15. (In Russ.). – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15>.

3. **Брейсуэлл, Р. Н.** Быстрое преобразование Хартли / Р. Н. Брейсуэлл // ТИИЭР. – 1984. – С. 19–27.

4. **Залманзон, Л. А.** Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – Москва: Наука, 1989. – С. 191–194.

5. Arduino FHT Library [Electronic resource]. – Mode of access: <http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT>. – Date of access: 01.08.2020.

E-mail: nil_pt@bntu.by.