



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-7-31-39>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.383:621.391

СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МГНОВЕННОГО СПЕКТРА ПО УОЛШУ

А.А. БУДЬКО, Т.Н. ДВОРНИКОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18 июня 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Работа посвящена разработке схем процессоров быстрого преобразования Уолша (БПУ) последовательно-параллельного типа. Процессоры БПУ предназначены для декодирования помехоустойчивых кодов и синхронизации, их использование позволяет снизить затраты при вычислении мгновенного спектра по Уолшу практически в 2 раза. Класс процессоров для вычисления мгновенного спектра по Уолшу назван процессорами последовательно-параллельного типа. Разработаны схемы процессоров БПУ последовательно-параллельного типа. Произведен сравнительный анализ построенных графов процессоров БПУ. Предложен способ и процессор для вычисления коэффициентов преобразования по Уолшу, позволяющий увеличить скорость производимых преобразований. При вычислении коэффициентов преобразования с помощью процессоров параллельного, последовательного и последовательно-параллельного типов было установлено, что процессоры БПУ последовательно-параллельного типа требуют при вычислении мгновенного спектра по Уолшу выполнения $2(N-1)$ операций. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств обработки дискретной информации, в телекоммуникационных системах при кодировании сигналов для их помехозащищенной передачи и декодировании, обеспечивающем оптимальное количество операций, а следовательно, оптимальные аппаратные затраты.

Ключевые слова: быстрое преобразование Уолша, процессоры, мгновенный спектр по Уолшу, помехоустойчивые коды.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Будько А.А., Дворникова Т.Н. Структуры процессоров для вычисления мгновенного спектра по Уолшу. Доклады БГУИР. 2021; 19(7): 31-39.

STRUCTURES OF PROCESSORS FOR CALCULATING THE INSTANT WALSH SPECTRUM

ANATOLI A. BUDZKO, TATYANA N. DVORNIKOVA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18 June 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The work is devoted to the development of circuits for fast Walsh transform processors of the serial-parallel type. The fast Walsh transform processors are designed for decoding error-correcting codes and synchronization; their use can reduce the cost of calculating the instantaneous Walsh spectrum by almost 2 times. The class of processors for computing the instantaneous spectrum according to Walsh is called serial-parallel processors. Circuits of the fast Walsh transform processors of serial-parallel type have been developed. A comparative analysis of the constructed graphs of the fast Walsh transform processors is carried out. A method and a processor for calculating the Walsh transform coefficients are proposed, which allows increasing the speed of the transformations performed. When calculating the conversion coefficients using processors of parallel, serial and serial-parallel types, it was found that controllers of the serial-parallel type require $2(N-1)$ operations when calculating the instantaneous spectrum according to Walsh. The results obtained can be used in the design of discrete information processing devices, in telecommunication systems when coding signals for their noise-immune transmission and decoding, which ensures the optimal number of operations, and therefore the optimal hardware costs.

Keywords: fast Walsh transform, processors, instant Walsh spectrum, noise-resistant codes.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Budzko A.A., Dvornikova T.N. Structures of processors for calculating the instant Walsh spectrum. Doklady BGUIR. 2021; 19(7): 31-39.

Введение

В наши дни объем информации, передаваемой через информационно-телекоммуникационные структуры в мире, удваивается каждые 2–3 года. Появляются и успешно используются новые отрасли и направления информационной индустрии. Одним из таких направлений является теория систем и средств передачи и обработки информации. При этом идет бурное развитие средств обработки информации, особую важность приобретают сложные территориально рассредоточенные информационные системы, базирующиеся на тесном взаимодействии вычислительной техники и средств передачи информации. Разработчики сложных информационных систем стремятся увеличить надежность и помехоустойчивость отдельных элементов систем (средств обработки информации, устройств памяти, ввода–вывода, модуляции–демодуляции и др.), причем даже при очень высокой надежности элементов необходимо использовать общесистемные средства повышения помехоустойчивости.

Новые методы передачи и обработки цифровой информации широко используют функции Уолша. Основным критерием применимости ортогональных систем является простота генерирования и спектральных преобразований. Генераторы функций Уолша используются в системах передачи информации в качестве генераторов сигналов, в цифровых фильтрах, анализаторах и синтезаторах, при непосредственном изучении таких сигналов и т. д. [1].

Вычисление коэффициентов преобразования

Одной из основных операций при обработке информации в базе функций Уолша является вычисление коэффициентов преобразования. Оно осуществляется с помощью

алгоритмов БПУ с использованием вычислительных машин или специализированных процессоров БПУ. К настоящему времени известно большое количество алгоритмов БПУ. Все эти алгоритмы требуют одно и то же количество операций, а именно $N \log_2 N$. Особое место занимают так называемые «замечательные» алгоритмы: алгоритмы типа «бабочка», позволяющие осуществлять вычисления на местах, экономя память; алгоритмы, имеющие одинаковый вид на каждой итерации и др. Выбор того или иного алгоритма зависит от решаемой задачи, а также от возможностей практической реализации [1].

Процессоры БПУ могут быть использованы для декодирования помехоустойчивых кодов и синхронизации. Процессоры БПУ можно разделить на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. Структуры процессоров параллельного типа повторяют структуры графов БПУ согласно алгоритму Гротера – Рейдера, и для их реализации подходят все алгоритмы быстрого преобразования, однако при этом требуются большие аппаратные затраты. Для построения процессоров параллельного типа используются алгоритмы БПУ, которые позволяют проводить вычисления «на местах», чтобы сократить аппаратные затраты, но при этом затраты очень велики. Гораздо меньшие аппаратные затраты можно получить при реализации процессоров БПУ последовательного типа. Однако в этом случае коэффициенты преобразования на выходе процессора получаются в последовательном виде [1].

В теории преобразований по Уолшу существуют следующие понятия спектров. Спектр по Уолшу – это коэффициенты преобразования в той или иной системе упорядочения от последовательности значений входного сигнала. При этом преобразования осуществляются со значениями входного сигнала $0 \div N-1$, $N \div 2N-1$, $2N \div 3N-1$ и т. д., то есть на составных интервалах.

Другое понятие спектра – спектр мощности, который содержит $n+1$ составляющих и инвариантен относительно циклического временного сдвига и двоичного сдвига. Составляющие спектра не являются квадратичными компонентами только одной функции Уолша, а характеризуют группы функций, при этом обратное восстановление сигнала по такому спектру мощности становится невозможным.

Третье понятие спектра – полный спектр мощности, инвариантный относительно циклического сдвига, который не зависит от системы упорядочения функций Уолша.

Однако в теории и многих практических приложениях важно производить оценку спектра по Уолшу на скользящем интервале, т. е. осуществлять вычисление коэффициентов преобразования от последовательностей, составленных из N значений входного сигнала, получаемых после каждого нового значения входного сигнала. Таким образом осуществляются преобразования по Уолшу от последовательностей, составленных из $0 \div N-1$, $1 \div N$, $2 \div N+1$ и т. д. значений входного сигнала [2].

В области гармонических спектров А.А. Харкевичем введено понятие мгновенного спектра, т. е. спектра, отражающего свойства процесса в данный момент времени. Это понятие соответствует спектру на скользящем интервале [5].

Таким образом, появляется еще одно понятие спектра – мгновенный спектр по Уолшу. Если записать преобразование Уолша от вектора входного сигнала $\bar{f}_i = [f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+N-1}]^T$, то при последовательном изменении индекса i простейшее определение мгновенного спектра по Уолшу в матричном виде будет иметь следующий вид:

$$\bar{F}_i = W_N \cdot \bar{f}_i. \quad (1)$$

Процессоры БПУ

Вычисление мгновенного спектра по Уолшу возможно с помощью процессоров параллельного и последовательно типа. Для процессоров БПУ параллельного типа характерна следующая последовательность преобразования входного сигнала. Значения входного сигнала поступают во входной регистр процессора, и после того как N значений входного сигнала записаны, начинается процесс вычисления коэффициентов преобразования. При этом вычисления ведутся параллельно со всеми значениями входного сигнала на каждой итерации

и коэффициенты преобразования на выходе процессора получаются одновременно (параллельно). Для получения мгновенного спектра по Уолшу необходимо производить вычисление коэффициентов преобразования после поступления кодового входного сигнала [2]. Процессор параллельного типа допускает это.

В процессорах последовательного типа значения входного сигнала поступают последовательно, и коэффициенты преобразования на выходе появляются также последовательно. Для того чтобы осуществить вычисление мгновенного спектра, необходимо N процессоров последовательного типа. При этом в первый процессор значения входного сигнала поступают непосредственно во второй процессор с задержкой на один такт, в третий – на два такта и т. д. Значения коэффициентов на выходах процессоров через $2N$ и более такта будут представлять собой мгновенный спектр Уолша [3].

Исследуя итерационную структуру вычисления спектральных коэффициентов от векторов $\bar{f}_i, \bar{f}_{i+1}, \bar{f}_{i+2}$ и т. д., можно заметить, что в преобразованиях имеются общие промежуточные результаты вычислений. Рассмотрим итерационную структуру преобразования векторов \bar{f}_0 и \bar{f}_1 . Для матрицы Уолша – Адамара, факторизуемой с помощью матрицы (2) (для $N = 3$)

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$H_N = H_{2^n} = G^n.$$

С помощью БПУ параллельного типа и БПУ последовательного типа вычисления на первой итерации являются результатом перемножения входного вектора на матрицу. Результаты вычислений от следующего вектора будут такими:

$$\begin{aligned} G\bar{f}_0 &: f_0 + f_4; f_0 - f_4; f_1 + f_5; f_1 - f_5; f_2 + f_6; f_2 - f_6; f_3 + f_7; f_3 - f_7. \\ G\bar{f}_1 &: f_1 + f_5; f_1 - f_5; f_2 + f_6; f_2 - f_6; f_3 + f_7; f_3 - f_7; f_4 + f_8; f_4 - f_8. \end{aligned} \quad (3)$$

Сравнение результатов показывает, что, начиная с вектора \bar{f}_1 , они будут общими. При выполнении первой итерации для следующего входного вектора потребуется выполнить дополнительно только две операции. На каждой последующей итерации число не общих результатов вычислений удваивается, и на последней итерации общие результаты вычислений отсутствуют. Эти выводы справедливы для любых двух векторов \bar{f}_i и \bar{f}_{i+1} . Используя промежуточные результаты вычисления коэффициентов преобразования от вектора \bar{f}_i , при вычислении коэффициентов преобразования от вектора \bar{f}_{i+1} можно сократить необходимое число операций для каждой новой оценки мгновенного спектра.

Для данной факторизации матрицы Уолша – Адамара граф вычисления мгновенного спектра Уолша при $N = 8$ приведен на рис. 1. Алгоритм вычисления мгновенного спектра Уолша в соответствии с графом рис. 1 легко программируется и реализуется на ЭВМ, а также может быть реализован с помощью специализированного процессора. Схема процессора БПУ для вычисления мгновенного спектра в соответствии с рассмотренным алгоритмом представлена на рис. 2 ($N = 8$). Процессор содержит $\log_2 N$ последовательно соединенных ступеней единичного преобразования. Каждая ступень единичного преобразования содержит блок задержки (регистр сдвига), арифметическое устройство и вентиляльное устройство.

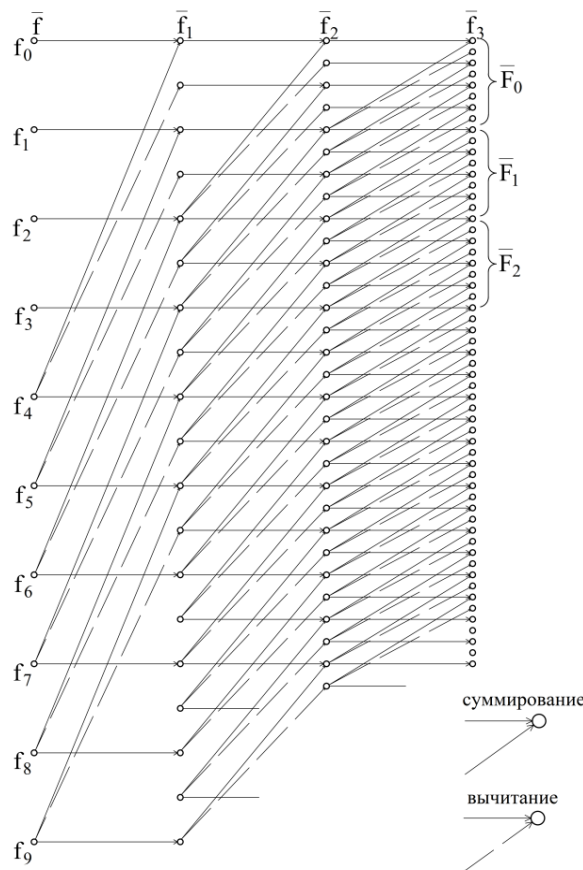


Рис. 1. Граф вычисления мгновенного спектра по Уолшу – Адамару
Fig. 1. Graph for calculating the instantaneous spectrum according to Walsh – Hadamard

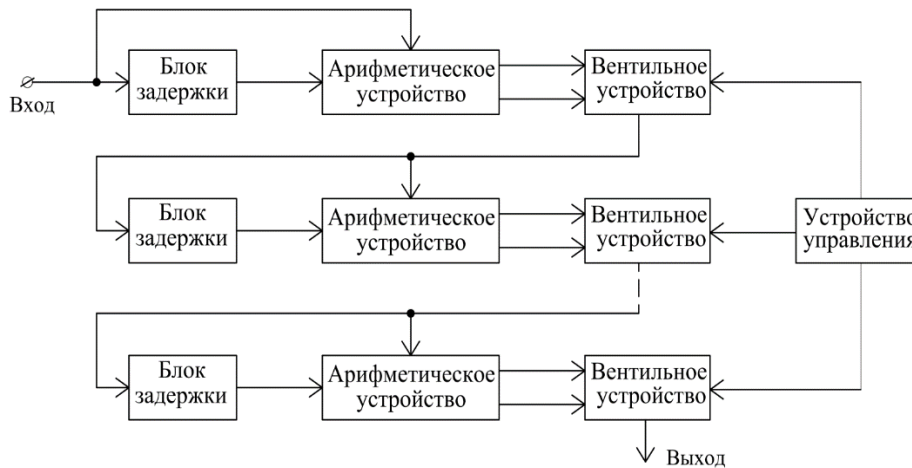


Рис. 2. Устройство БПУ по Уолшу – Адамару
Fig. 2. The device of the control room according to Walsh-Hadamard

Алгоритм вычисления на каждой итерации одинаков, поэтому в каждой ступени преобразования регистры сдвига имеют одинаковую длину, равную $N/2$. Для $N = 8$ длина регистров – 4. Исходя из особенностей графа на рис. 1 и алгоритма работы устройства, частота тактовых импульсов в регистрах ступеней различна. При этом тактовая частота в регистре первой ступени совпадает с частотой поступления значений входного сигнала, а в регистрах сдвига каждой последующей ступени тактовая частота в 2 раза больше, чем в предыдущей. Возрастание тактовой частоты является необходимым условием получения высокоэффективного алгоритма вычислений данного процессора, при котором промежуточные результаты вычисления коэффициентов преобразования от одной последовательности используются при вычислении коэффициентов преобразования последующей

последовательности. Количество необходимых при этом операций сокращается. Одинаковый вид на каждой итерации позволяет реализовать такой БПУ.

При вычислении коэффициентов преобразования с помощью процессоров параллельного и последовательного типов от вектора длиной $N = 8$ требуется $N \cdot \log_2 N = 24$ операции и такое же количество операций при вычислении коэффициентов преобразования от любых других векторов длиной $N = 8$. Для вычисления коэффициентов преобразования от каждого вектора, кроме первого, используются промежуточные результаты вычисления коэффициентов преобразования от предыдущего вектора. При этом на первой итерации необходимо выполнить только две операции, а на каждой последующей итерации число операций удваивается.

Временной график работы процессора, представляющий собой алгоритм вычисления мгновенного спектра по Уолшу во времени, показан на рис. 3.

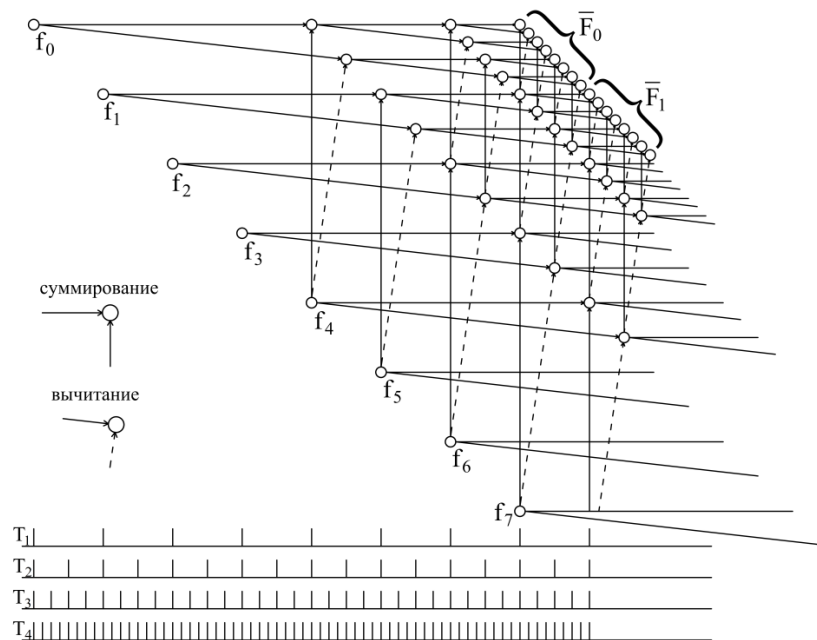


Рис. 3. Временной график работы процессора БПУ
Fig. 3. Time graph of the BPU processor

Исходя из этого, в общем случае, для каждой новой оценки мгновенного спектра по Уолшу требуется операций

$$q = 2^1 + 2^2 + \dots + 2^{\log_2 N} = 2(N-1). \quad (4)$$

Из графа на рис. 1 и временного графа работы процессора на рис. 3 видно, что для получения коэффициентов преобразования с помощью процессора (рис. 2) от вектора \vec{f}_0 , требуется $N \cdot \log_2 N = 24$ операций, а для вычисления коэффициентов преобразования от векторов \vec{f}_1 , \vec{f}_2 и т. д. достаточно 14 операций. Кроме того, процессор для вычисления мгновенного спектра вычисляет и обычный спектр Уолша, т. е. спектр на составных интервалах, и может использоваться вместо процессоров последовательного типа. Процессор БПУ для вычисления мгновенного спектра (рис. 2) к приходу $N + 1$ (такта) значения входного сигнала вычисляет все коэффициенты ортогонального преобразования от последовательности, составленной из поступивших N значений входного сигнала, т. е. он вычисляет коэффициенты преобразования значительно быстрее.

Недостаток процессора – относительно низкая предельная частота поступающего входного сигнала. Это вызвано тем, что частота работы ступеней возрастает. Недостаток сказывается тем больше, чем длиннее обрабатываемые последовательности [4].

Этот недостаток исключен у процессора БПУ для вычисления мгновенного спектра, изображенного на рис. 4. Он содержит блок преобразования в первой ступени преобразования,

два блока преобразования во второй ступени преобразования и четыре блока преобразования в третьей ступени преобразования.

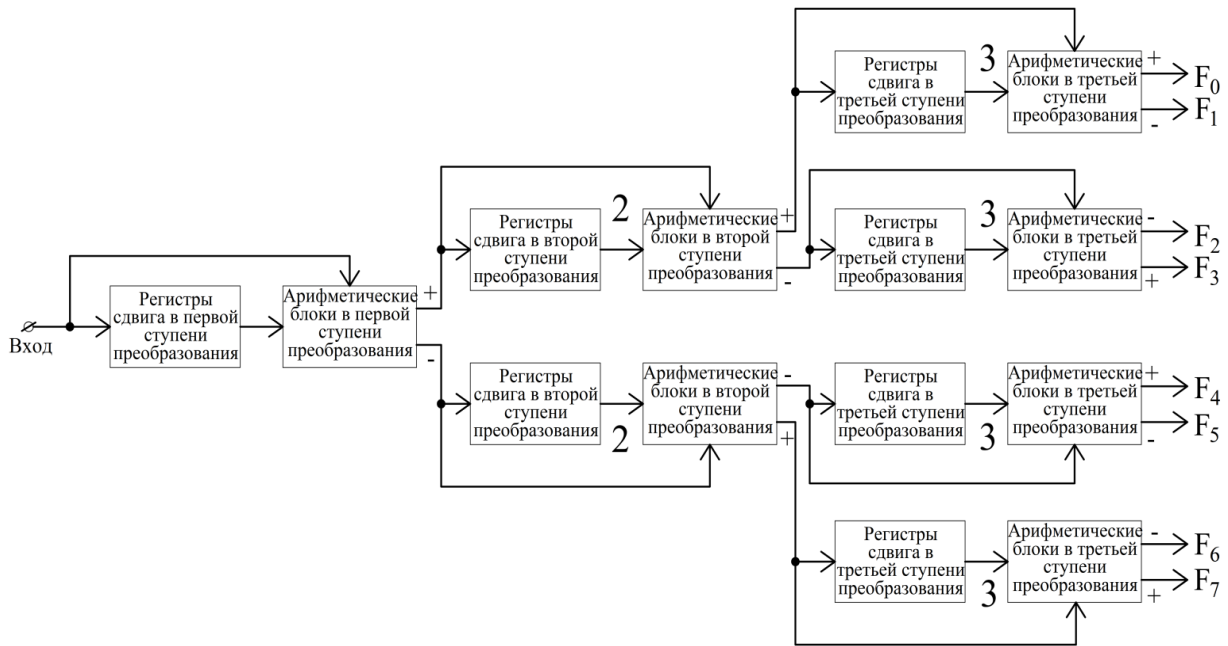


Рис. 4. Устройство БПУ последовательно-параллельного типа (1, 2, 3 – блоки преобразования первой, второй и третьей ступени преобразования)

Fig. 4. The block control unit of the serial-parallel type (1, 2, 3 – conversion units of the first, second and third conversion stages)

Блок преобразования состоит из регистра сдвига и арифметического устройства. В первой ступени преобразования регистр сдвига имеет один разряд, а в каждой последующей ступени – в два раза больше, чем в предыдущей. В общем случае в k -й ступени преобразования содержится 2^{k-1} блоков преобразования, и регистры сдвига в блоках преобразования имеют длину 2^{k-1} . На рис. 5 показан временной граф работы процессора.

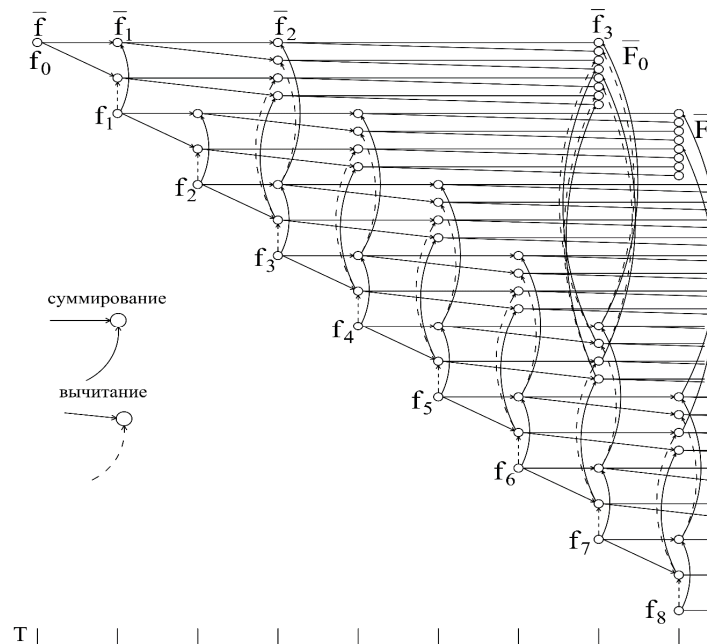


Рис. 5. Временной граф устройства БПУ
Fig. 5. Time graph of the fast Walsh transform device

Значения сигнала с суммарного выхода арифметического устройства поступают на один блок преобразования второй ступени преобразования, а с разностного выхода на другой. Блоки преобразования во второй и третьей ступени преобразования работают аналогично, только задержка сигнала в регистре сдвига во второй ступени на два такта, а в третьей – на четыре. На выходах блоков преобразования третьей ступени преобразования после седьмого тактового импульса получаются коэффициенты преобразования по Уолшу от последовательности, составленной из первых восьми значений входного сигнала. После восьмого тактового импульса – от последовательности, составленной со второго по девятое значение входного сигнала и т. д. Таким образом, предлагаемый процессор вычисляет с каждым тактом коэффициенты ортогонального преобразования по Уолшу – Качмажу от последовательности, составленной из N значений сигнала, поступивших на вход устройства, т. е. мгновенный спектр.

В силу того, что значения входного сигнала поступают в процессоры для вычисления мгновенного спектра по Уолшу последовательно, а коэффициенты преобразования получаются к каждому новому значению входного сигнала (параллельно), такие процессоры названы последовательно-параллельными.

Заключение

Процессоры БПУ последовательно-параллельного типа требуют при вычислении мгновенного спектра по Уолшу выполнения $2(N-1)$ операций, что примерно в $n/2$ раз меньше по сравнению с процессорами БПУ последовательного и параллельного типов. Если $N = 16$, то требуется $16 \cdot 4 = 64$ операции, а при реализации с помощью структуры БПУ последовательно-параллельного типа $2 \cdot (16-1) = 30$ операций. Алгоритм вычисления мгновенного спектра по Уолшу можно использовать при проектировании устройств обработки дискретной информации.

Список литературы

1. Зеленков А.В. Нерекурсивные алгоритмы спектрального анализа на скользящем интервале в базисе функций Виленкина – Кристенсона. *Радиотехника и электроника*. 1976;12.
2. Бесветтер Ф.К. Генерирование функций Уолша. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1972;11:68-78.
3. Лосев В.В., Дворников В.Д. Декодирование кода максимальной длины при помощи БПУ. *Радиотехника и электроника*. 1979;3:1233-1239.
4. Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И. *Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов*. Москва: Радио и связь; 1988.
5. Харкевич А.А. *Спектры и анализ*. Москва: Физмат; 1962.

References

1. Zelenkov A.V. [Non-recursive algorithms for spectral analysis on a sliding interval in the basis of Vilenkin – Christenson functions]. *Radio engineering and electronics*. 1976;12. (In Russ.)
2. Besvetter F.K. [Generation of Walsh functions]. *Foreign radio electronics* 1972;11:68-78. (In Russ.)
3. Losev V.V., Dvornikov V.D. [Decoding of the maximum length code using the control unit]. *Radio engineering and electronics*. 1979;3:1233-1239. (In Russ.)
4. Losev V.V., Brodskaya E.B., Korzhik V.I. [Search and decoding of complex discrete signals]. Moscow: Radio and communications; 1988. (In Russ.)
5. Kharkevich A.A. [Spectra and Analysis]. Moscow: Fizmat; 1962. (In Russ.)

Вклад авторов

Будько А.А., осуществил постановку задачи определения способа и процессора для вычисления коэффициентов преобразования по Уолшу, позволяющих увеличить скорость производимых преобразований.

Дворникова Т.Н. предложила способ вычисления коэффициентов преобразования по Уолшу, позволяющий увеличить скорость производимых преобразований.

Authors' contribution

Budzko A.A. carried out the formulation of the problem of determining the method and processor for calculating the conversion coefficients according to Walsh, which make it possible to increase the speed of the transformations performed.

Dvornikova T.N. proposed the method for calculating the conversion coefficients according to Walsh, which makes it possible to increase the speed of the transformations performed.

Сведения об авторах

Будзько А.А., к.т.н., доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дворникова Т.Н., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Budzko A.A., PhD, Associate Professor at the Department of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dvornikova T.N., M.Sc, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220055, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Каменногорская, 100, оф. 187;
тел. +375-44-755-57-64;
e-mail: tania.d@inbox.ru
Дворникова Татьяна Николаевна

Address for correspondence

220055, Republic of Belarus,
Minsk, Kammenogorskaya str., 100, of. 187;
tel. +375-44-755-57-64;
e-mail: tania.d@inbox.ru
Dvornikova Tatsiana Nickolaevna