

## **Применение нейропроцессора Л1879ВМ1 для цифровой обработки сигналов РЛС обзора земной поверхности \***

### **Application of neuroprocessor L1879VM1 for digital processing signals in radars of the review of a terrestrial surface**

ктн Сахно И.В., ктн Харченко А.В., Гаврилов Д.А.

Sakhno I.V., Kharchenko A.V., Gavrilov D.A.

Работа посвящена анализу возможности реализации программно – аппаратного комплекса синтеза радиолокационных изображений земной поверхности с использованием отечественного нейропроцессора Л1879ВМ1. Описывается алгоритм БПФ, реализованный с учетом особенностей внутренней структуры процессора. Приводятся результаты анализа производительности и точности алгоритма. Описывается состав программно - аппаратного комплекса синтеза радиолокационных изображений.

Work is devoted to the analysis of an opportunity of realization of a program and hardware complex of synthesis of radar images of a terrestrial surface with use domestic neuroprocessor L1879VM1 . Algorithm FFT realized in view of features of an inner pattern of the processor is described. Results of the analysis of productivity and accuracy of algorithm are resulted. The structure of a program and hardware complex of synthesis of radar images is described.

В настоящее время РЛС обзора земной поверхности по праву являются одним из основных и наиболее информативных средств дистанционного зондирования земной поверхности при решении как оборонных, так и хозяйственных задач. Этому способствуют известные и неоспоримые преимущества радиолокационных средств наблюдения: всепогодность, высокая оперативность и информативность, большие дальности наблюдения. Подтверждением этого является широкая номенклатура радиолокационных средств с цифровым синтезированием апертуры антенны (РСА) авиационного и космического базирования, находящих свое применение как у нас в стране, так и за рубежом.

В настоящее время активно ведутся разработки космических РСА **третьего поколения**, основными особенностями которых являются:

- применение КА малого и среднего класса (массой 700...1500кг);
- зондирование поверхности в одном - двух частотных диапазонах;
- использование нескольких поляриметрических каналов приема;
- наличие режима селекции движущихся целей и интерферометрической съемки;
- ширина полосы захвата от 2...5 до 300...500 км;

- разрешающая способность – от единиц метров до 100...150 м;
- скорости передачи радиолокационных данных в центр обработки возрастут до 300...600 Мбит/с;
- благодаря использованию цифровых процессоров обработки сигналов наряду со специализированными вычислительными системами будет обеспечен режим обработки радиолокационной информации в масштабе времени, близком к реальному.

Отмеченные особенности РСА третьего поколения и определяют требования по производительности к системе ЦОС. Поэтому, основные усилия в данной области направлены на разработку и создание специальных программно – аппаратных комплексов, имеющих высокую производительность, малые габариты и низкую потребляемую мощность, в соответствии с имеющим место стремлением переноса всего цикла обработки непосредственно на борт носителя РСА. Особенно актуальна эта задача применительно к РСА космического базирования и в том числе планируемых к реализации на основе малых космических аппаратов.

### **Выбор элементной базы программно-аппаратного комплекса**

Возможность обеспечения необходимых технических характеристик РСА в значительной степени определяется рациональным выбором элементной базы комплекса ЦОС и синтеза РЛИ. Одним из возможных путей является применение цифровых сигнальных процессоров (ЦСП).

Не вызывает сомнений факт ведущей роли иностранных фирм (таких как Texas Instruments, Lucent Technologies, Analog Devices и Motorola) на рынке цифровых процессоров обработки сигналов. Однако разработка и начало поставок отечественного 64-разрядного нейропроцессора Л1879ВМ1 (производства НТЦ "Модуль", [www.module.ru](http://www.module.ru)), обладающего уникальными возможностями для решения прикладных задач в различных областях (построение нейросетей, цифровая обработка сигналов, распознавание образов и др.), позволяет при выборе элементной базы ориентироваться на отечественного производителя. Следует отметить, что, не смотря на низкую по современным меркам тактовую частоту, процессор Л1879ВМ1 за счет имеющегося механизма распараллеливания вычислений выглядит весьма достойно на фоне процессоров зарубежных марок с более высокой тактовой частотой и даже способен превзойти их по отдельным показателям. Так например, процессор способен достичь производительности от 50 до 14400 ММАС (миллионов умножений с накоплением в секунду) в зависимости от разрядности обрабатываемых входных данных.

Кроме того, не следует забывать о том, что ориентация технических средств обработки сигналов на российского производителя микропроцессорной техники наиболее предпочтительна в силу имеющей место военной специфики РСА космического базирования, поскольку, по известным причинам, перспективные образцы вооружения, военной техники и иное специальное оборудование должны создаваться исключительно на основе отечественной элементной базы.

Процессор Л1879ВМ1 представляет собой высоко-производительный “dual-core” микропроцессор со смешанной VLIW/SIMD архитектурой. В его состав входят 32-разрядное RISC ядро и 64-разрядный векторный сопроцессор, выполняющий операции векторной арифметики над данными с программируемой разрядностью от 1 до 64 бит. Тактовая частота 40 МГц. Потребляемая мощность ~1,3 Вт при напряжении питания 3,3 В. Диапазон рабочих температур: – 60... + 85<sup>0</sup> С.

Отличительной особенностью векторного сопроцессора является наличие в его составе рабочей матрицы — операционного узла, в котором осуществляются операции умножения с накоплением.

Умножение с накоплением, называемое также взвешенным суммированием, математически записывается следующим образом:

$$Z_i = Y_i + \sum_{j=1}^N X_j W_{ij},$$

где  $Z_i$  — элемент выходного вектора;  $X_j$  — элемент данных, поступающих на вход  $X$  операционного узла;  $Y_i$  — частичная сумма, накопленная на предыдущем шаге взвешенного суммирования;  $W_{ij}$  — весовой коэффициент, расположенный в соответствующей ячейке рабочей матрицы;  $M, N$  — количество столбцов и строк рабочей матрицы соответственно.

Как видно из формулы рабочая матрица векторного сопроцессора осуществляет операцию аналогичную операции, выполняемой формальным нейроном, являющегося основным элементом нейронной сети. Элементы данных  $X_j$  операционного узла соответствуют значениям на  $J$ -ом входе нейрона, весовые коэффициенты  $W_{ij}$  — коэффициентам, характеризующим силу синаптической связи. Поэтому процессор Л1879ВМ1 также называют нейропроцессором NeuroMatrix ® NM6403.

Уникальные технические характеристики, поставки микросхем, программных и аппаратных средств поддержки, согласование технических условий с 22 ЦНИИИ МО да-

ют основание выбрать отечественный нейропроцессор Л1879ВМ1 для реализации на его основе программно-аппаратного комплекса ЦОС и синтеза РЛИ.

### **Программно-аппаратный комплекс синтеза РЛИ**

Прототип программно-аппаратного комплекса синтеза РЛИ реализован на кафедре космической радиолокации и радионавигации ВКА имени А.Ф. Можайского на основе платы МЦ 4.01 разработки НТЦ "Модуль", содержащей два равноправных по функциям процессора Л1879ВМ1. Кроме анализа потенциальных возможностей синтеза РЛИ на основе Л1879ВМ1, реализованный прототип используется также в учебных целях.

Плата МЦ 4.01 является устройством, подключаемым к инструментальному (host) компьютеру через стандартный PCI-разъём. Каждый установленный на плате процессор имеет на своей локальной шине банки динамической (32Мб) и статической памяти (512Кб). Эти банки доступны только своему процессору. Кроме того, на плате установлены два банка статической памяти по 512Кб, доступ к которым разделен между обоими процессорами и host-компьютером. Для каждого из процессоров эти банки являются глобальными; host-компьютеру они доступны через окна памяти PCI устройства. Оба процессора при этом могут работать отдельно, используя только свой банк памяти, не мешая, и не замедляя работу друг друга.

Для работы с МЦ 4.01 используется схема управления через разделяемую память: host-компьютер загружает память процессоров данными и исполняемым кодом и использует локальные конфигурационные регистры PCI контроллера (которые также доступны) для запуска процессоров. Доступ к ресурсам платы МЦ 4.01 осуществляется посредством функций библиотеки загрузки и обмена, поставляемой разработчиком. Это позволяет пересылать сигнал радиолокационной голограммы для обработки с host-компьютера на плату МЦ 4.01 и получать обратно синтезированное РЛИ.

Таким образом, host-компьютер выполняет в составе комплекса функции начальной загрузки двух процессоров Л1879ВМ1 платы МЦ 4.01, диспетчеризацию их работы и осуществляет передачу и прием массивов данных.

Для работы комплекса разработано необходимое управляющее программно – математическое обеспечение (ПМО) для host-компьютера и отдельно загружаемое ПМО для процессора Л1879ВМ1.

Разработанное ПМО реализует процедуру когерентной обработки отсчётов отраженного сигнала РСА по азимуту методом "быстрой" свертки. Структурная схема алгоритма приведена на рисунке 1.

По сути, приведенный алгоритм реализует вычисление интеграла свертки

$$|\dot{J}(\tau)| = \left| \int_{-Tc/2}^{Tc/2} \dot{S}(t - \tau) \cdot \dot{h}(t) dt \right|, \text{ но только в частотной области в соответствии с известным}$$

свойством свёртки

$$\dot{S}(t - \tau) \otimes \dot{h}(t) = F\{\dot{S}(t - \tau)\} \cdot F\{\dot{h}(t)\},$$

где  $\dot{S}(t - \tau)$  — входной сигнал радиолокационной голограммы для одной строки по азимуту длительностью  $Tc$ ;

$\dot{h}(t)$  — сигнал опорной функции;  $\otimes$  — символ временной свертки.

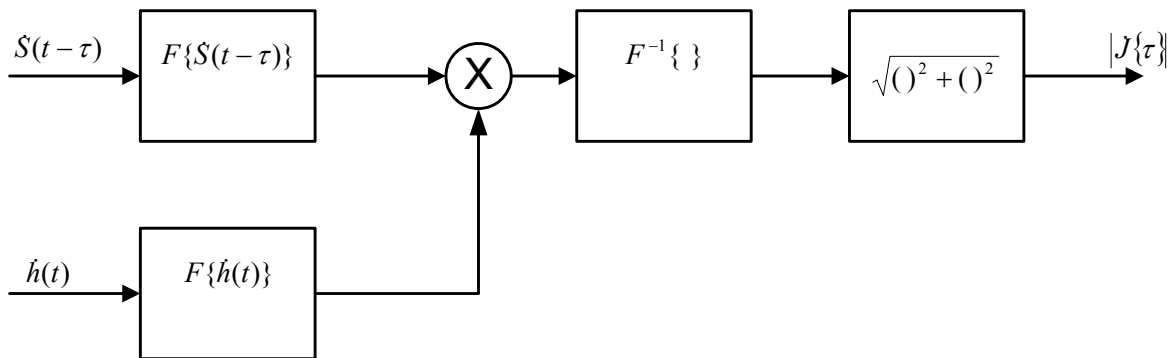


Рисунок 1. Структурная схема алгоритма "быстрой" свертки.

Поскольку свертке двух функций во временной области соответствует произведение преобразований Фурье этих функций в частотной, то использование этого свойства позволяет перенести обработку принимаемого сигнала из временной области в частотную.

Решение задачи синтеза РЛИ на основе радиолокационных голограмм современных РСА требует объёмных и трудоёмких вычислений [5], в основе которых лежит алгоритм дискретного преобразования Фурье (ДПФ). При этом производительность алгоритма синтеза РЛИ в целом, будет зависеть и от эффективности реализации ДПФ с учетом особенностей архитектуры процессора Л1879ВМ1.

### Организация вычислений дискретного преобразования Фурье на процессоре Л1879ВМ1

Для снижения вычислительных затрат N-точечного ДПФ, определяемого формулой

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{kn} \quad \text{где } W_N^{kn} = e^{-i \frac{2\pi}{N} kn},$$

на практике широко используются различные вариации алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) по основанию 2 [1], минимизирующие, прежде всего, количество операций умножения. Однако, как отмечено в [2] и [3], для векторного нейропроцессора Л1879ВМ1, минимизация количества умножений становится несущественной. Напротив, одновременно (параллельно) выполняемые умножения позволяют использовать процессор наиболее эффективно. Распараллеливание вычислений при практической реализации ДПФ достигается применением алгоритмов БПФ с более высокими основаниями и их возможными комбинациями.

Соотношение, являющееся опорным для построения БПФ по произвольным основаниям, имеет вид [1]:

$$X(s + L \cdot r) = \sum_{m=0}^{M-1} W_M^{rm} W_N^{sm} \sum_{l=0}^{L-1} x(M \cdot l + m) \cdot W_L^{sl},$$

где  $N = M \cdot L$ ,  $M$ ,  $L$  — основания БПФ,  $n = M \cdot l + m$ ,  $k = s + L \cdot r$ ,

$$n = 0 \dots N - 1, l = 0 \dots L - 1, m = 0 \dots M - 1,$$

$$k = 0 \dots N - 1, s = 0 \dots L - 1, r = 0 \dots M - 1.$$

При выборе основания алгоритма БПФ необходимо одновременно учесть несколько факторов: диапазон входных и выходных данных, точность результатов вычислений, а также, характеризующее общую производительность, время выполнения алгоритма.

Подлежащий обработке сигнал, являющийся строкой радиолокационной голограммы, представлен в виде массива 512 целых комплексных чисел. Проведённые исследования показали, что наиболее рациональным в этом случае является реализация 512-ти точечного БПФ по основаниям  $L = 16$  и  $M = 32$ :

$$X(s + 16 \cdot r) = \sum_{m=0}^{31} W_{32}^{rm} W_{512}^{sm} \sum_{l=0}^{15} x(32 \cdot l + m) \cdot W_{16}^{sl}.$$

Все вычисления используют целочисленную арифметику (данные и результаты представлены числами с фиксированной точкой), при этом вычисления, относящиеся непосредственно к вычислению БПФ, выполняются на векторном сопроцессоре. Для исключения переполнения применяется нормализация результатов вычислений.

Входные и выходные данные являются массивами целых комплексных чисел с 32-разрядными мнимыми и действительными частями. Так как векторный сопроцессор позволяет оперировать данными переменной разрядности, это позволяет в одном 64-х разрядном слове разместить одно комплексное число.

Множители (коэффициенты)  $W_N^{kn}$  Фурье-преобразования вычисляются заранее. Их действительные и мнимые части представлены 10 разрядными числами и, в отличие от

данных, хранятся упакованными в различных 64-х разрядных словах в порядке удобном для последующих вычислений. Формат хранения входных данных и коэффициентов Фурье-преобразования представлен на рисунке 2.

Далее, пользуясь описанной в [2] методикой, рассмотрим организацию вычисления БПФ на процессоре Л1879ВМ1.

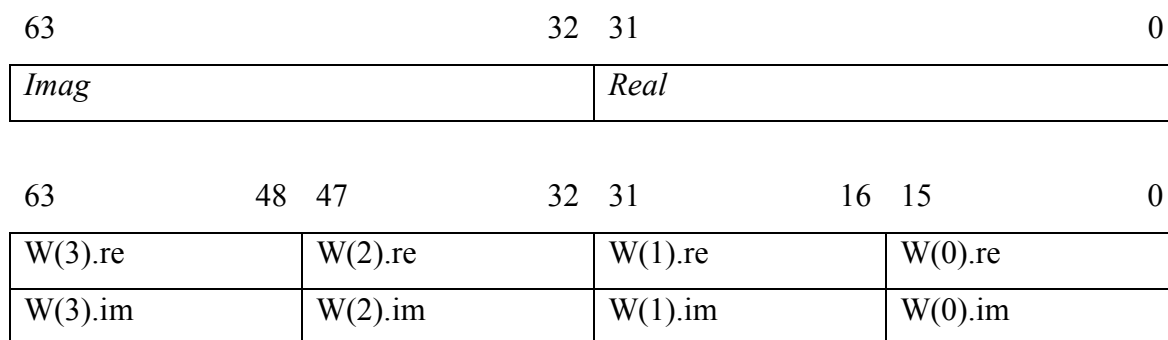


Рисунок 2. Формат хранения входных данных и коэффициентов  $W_N^{kn}$ .

Процедура вычисления 16-ти точечного ДПФ  $\sum_{l=0}^{15} x(32 \cdot l + m) \cdot W_{16}^{sl}$  состоит из пяти этапов:

Этап 1. В матрицу весовых коэффициентов загружаются 4 комплексных числа  $x(0) \dots x(3)$ . На вход  $X$  умножителя сначала подаётся вектор из 4-х действительных частей комплексных коэффициентов  $W(0) \dots W(3)$  (здесь  $W(l) = W_{16}^{s \cdot l}$ ), а затем вектор из 4-х мнимых частей. Умножение производится согласно схеме на рисунке 3 за один такт.

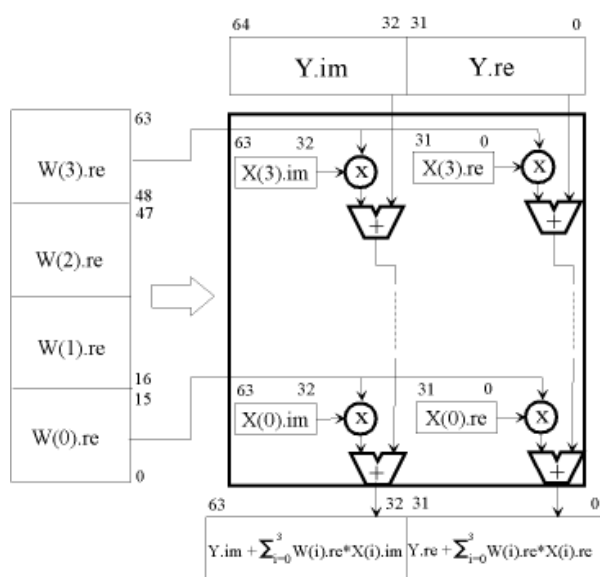


Рисунок 3. Выполнение этапа №1 алгоритма на векторном сопроцессоре.

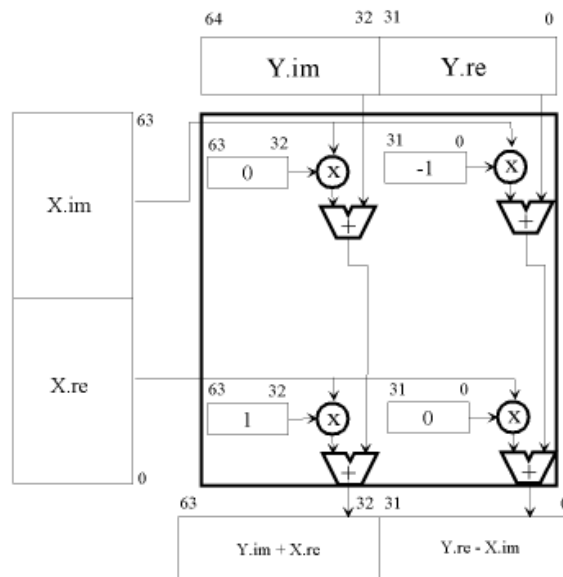


Рисунок 4. Выполнение сложения на векторном сопроцессоре.

Этап 2. С выхода умножителя результат произведения в виде двух 64-х разрядных слов непосредственно поступает на суммирующий вход  $Y$ . При этом в матрицу весовых коэффициентов загружаются числа  $x(4)\dots x(7)$ , а на вход  $X$  умножителя аналогично поступают и умножаются новые коэффициенты  $W(4)\dots W(7)$ .

Этап 3. Аналогичен этапу 2. Выполняется для отсчётов  $x(8)\dots x(11)$  и коэффициентов  $W(8)\dots W(11)$ .

Этап 4. Аналогичен этапам 2 и 3. Выполняется для отсчётов  $x(12)\dots x(15)$  и коэффициентов  $W(12)\dots W(15)$ .

Этап 5. Суммы в левых и правых частях двух последних результатов перекрестно складываются (с учетом знака "-"). Для этого в матрицу весовых коэффициентов загружаются числа 0, 1 и -1, а сами суммы подаются на входы  $X$  и  $Y$ . Далее, работая по схеме, изображённой на рисунке 4, векторный умножитель выдает конечный результат.

Процедура вычисления 32-х точечного ДПФ подобна процедуре вычисления 16-ти точечного. При этом вся процедура будет состоять из девяти этапов: восемь умножений по схеме на рисунке 3 и одно перекрестное сложение по схеме на рис. 4.

Выше описан процесс скалярного умножения только двух векторов. В действительности загрузка входных данных осуществляется пакетами по 32 64-разрядных слова, что позволяет максимально эффективно использовать векторный сопроцессор. В результате, с учетом времени передачи данных, каждый шаг умножения практически занимает один процессорный такт, это достигается за счет одновременного использования двух шин данных: подкачка входных данных  $x(i)$  по одной шине совмещается с загрузкой коэффициентов  $W(i)$  или выгрузкой результатов умножения  $y(i)$  по другой.

## **Оценка точности и производительности**

Точность решения задачи синтеза РЛИ оценивалась путём сравнения результатов обработки сигнала радиолокационной голограммы  $\dot{S}(t - \tau)$ . В качестве обрабатываемого сигнала (рис. 5) была выбрана одна строка по азимуту реальной радиолокационной голограммы, содержащая одиночный точечный отражатель. Результат обработки — сигнал реального радиолокационного изображения  $|\dot{J}(\tau)|$  на выходе системы ЦОС (рис. 6), позволяет оценить разрешающую способность РСА, динамический диапазон РЛИ, уровень шумового фона и отношение сигнал/фон.

Обработка голограммы (рис.5) производилась на основе трёх алгоритмов БПФ, реализованных различными способами, а именно:

Алгоритм 1. Это описанный выше алгоритм БПФ с основаниями 16 и 32, при этом для представления коэффициентов Фурье отводится 9 бит.

Алгоритм 2. Алгоритм БПФ, разработанный НТЦ "Модуль", с основаниями 16, 16 и 2 с 6-ти битными коэффициентами Фурье.

Алгоритм 3. Алгоритм БПФ, также разработанный НТЦ "Модуль", с основаниями 16, 16 и 2, но с 7-ти битными коэффициентами Фурье.

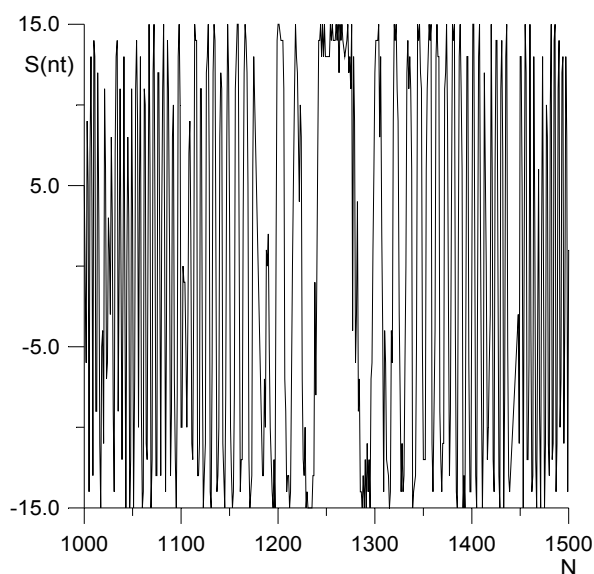


Рисунок 5. Строка радиолокационной голограммы.

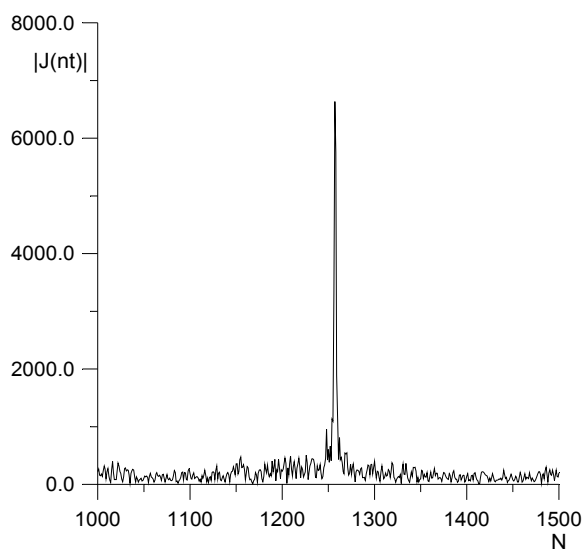


Рисунок 6. Строка синтезированного РЛИ точечного отражателя.

В качестве эталонного ("точного") алгоритма использовался алгоритм БПФ, реализованный на ПЭВМ, с использованием сигнальной библиотеки фирмы Intel для чисел с плавающей запятой (тип данных - double).

Исходный сигнал голограммы (рис. 5) последовательно обрабатывался с использованием алгоритмов 1, 2 и 3. Затем определялась разность строки синтезированного РЛИ (рис.6), полученной с помощью данных алгоритмов, и этой же строки РЛИ, но полученной при помощи сигнальной библиотеки фирмы Intel.

На рисунках 7, 8 и 9 приведены гистограммы для разностей между строкой РЛИ, синтезированной с использованием алгоритма БПФ, реализованного на ПЭВМ, и строкой РЛИ, синтезированной с использованием реализованных на процессоре L1879VM1 алгоритмов 1, 2 и 3 соответственно.

Ослабление амплитуды сигнала точечного отражателя на РЛИ при использовании алгоритма 1 практически не наблюдалось, а при использовании алгоритмов 2 и 3 оно составляло 0.8% и 4.3% соответственно.

Для сравниваемых алгоритмов БПФ, имеют место систематическая и случайная погрешности, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1.

	Систематическая погрешность	Случайная погрешность
Алгоритм 2	2.59	1.94
Алгоритм 3	3.77	2.64
Алгоритм 1	0.83	0.73

Производительность алгоритмов сравнивалась по времени, затрачиваемом на синтез изображения, отдельно для алгоритма быстрой свертки в целом и отдельного БПФ в ее составе. Время выполнения алгоритма определялось как с использованием таймера host-компьютера, так и с использованием таймера процессора L1879BM1, в последнем случае погрешность оценки составит около 25нс. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Обработка всего РЛИ	Одно преобразование Фурье
Алгоритмы 2 и 3	133 сек	0.00206 сек
Алгоритм 1	48 сек	0.00124 сек
Intel	18 сек	0.00054 сек

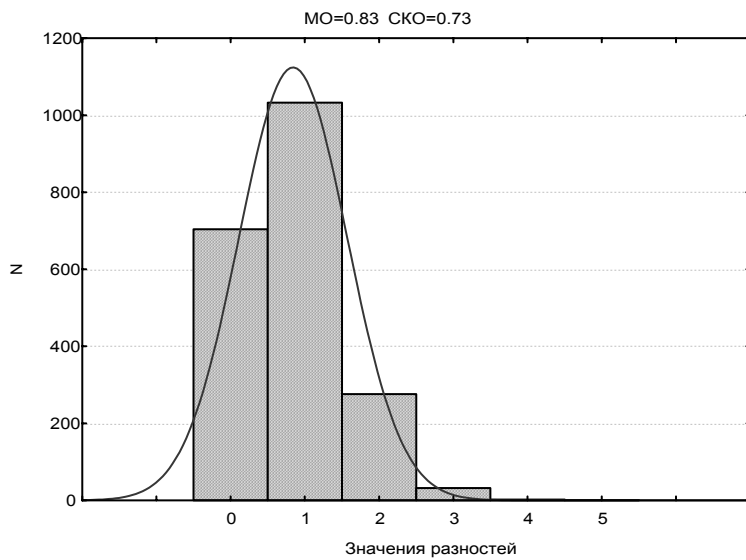


Рисунок 7

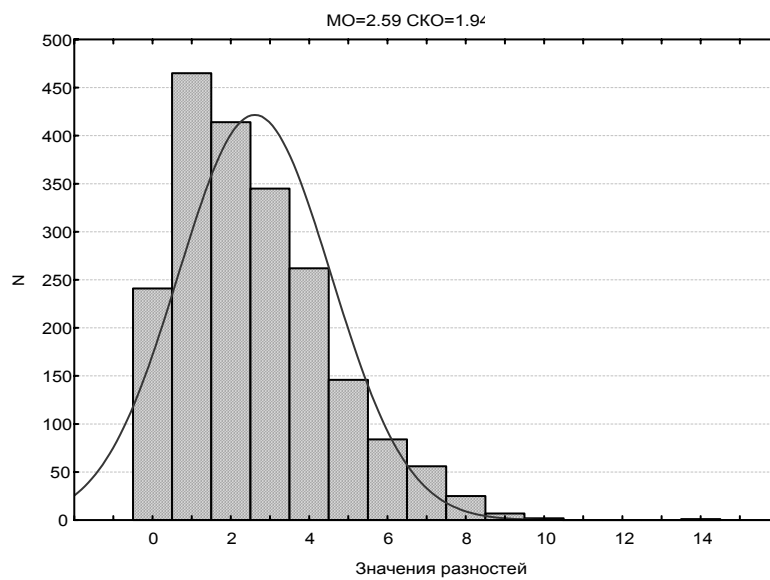


Рисунок 8

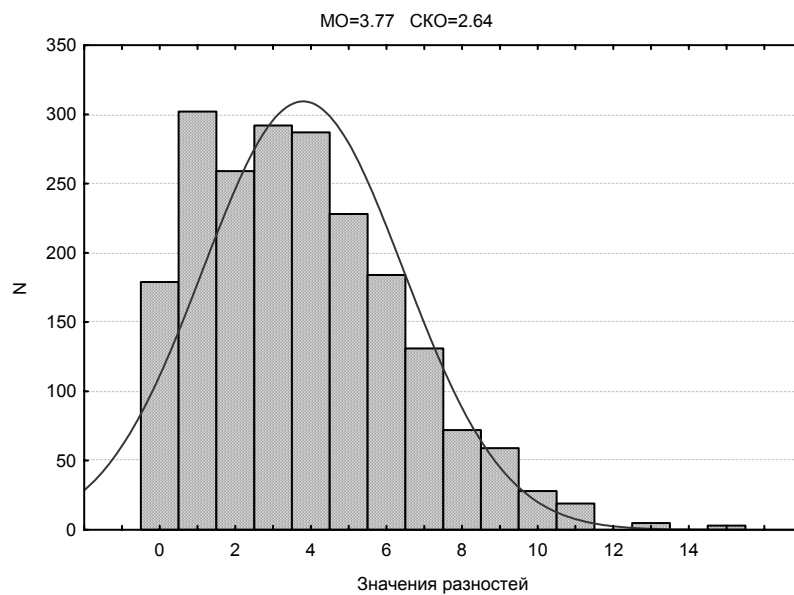


Рисунок 9

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что нейропроцессор Л1879ВМ1 может быть использован в составе системы ЦОС и синтеза РЛИ. Он в состоянии обеспечить достаточно высокую производительность в сочетании с приемлемой точностью вычислений. Дальнейший рост производительности (не менее чем в 2 раза) программно – аппаратного комплекса синтеза РЛИ может быть достигнут путем совместного использования двух процессоров платы МЦ 4.01 или путем установки в ПЭВМ дополнительных однотипных плат ЦОС. В последнем случае производительность будет расти пропорционально количеству одновременно задействованных процессоров Л1879ВМ в составе программно – аппаратного комплекса.

#### Литература.

1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Ю.Н. Александрова. — М.: Мир, 1978. — 848 с.: ил.
2. Организация параллельных вычислений в алгоритмах БПФ на процессоре NM6403 Кашкаров В.А., Мушкаев С.В. НТЦ “Модуль”, г. Москва (Журнал ЦОС)
3. Применение процессора NM6403 (Л1879ВМ1) для сжатия изображений. С.В. Мушкаев, С.В. Ландышев. (Журнал ЦОС )
4. “Нейропроцессор NM6403. Введение в архитектуру” М.: НТЦ ”Модуль”, 1998. (<http://www.module.ru/files/nm6403ao11b-r.pdf>.)
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. / Под ред. В.Т. Горяинова . – М.: Радио и связь, 1988 – 304с.: ил.

\* Поддержана Советом по грантам Президента РФ, грант № НШ-2355.2003.9

## Сведения об авторах.



Сахно Игорь Викторович, 1968 г.р., кандидат технических наук, доцент кафедры космической радиолокации и радионавигации ВКА им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов – радиолокационные системы дистанционного зондирования, цифровая обработка сигналов.



Харченко Александр Викторович, 1967 г.р., кандидат технических наук, заместитель начальника кафедры телеметрических систем ВКА им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов – системы цифровой обработки сигналов, цифровые сигнальные процессоры.



Гаврилов Денис Александрович, 1982 г.р., курсант факультета радиоэлектроники ВКА им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов – радиолокационные системы дистанционного зондирования, цифровая обработка сигналов.