

Раздел IV. Проблемно-ориентированные и встраиваемые вычислительные системы

УДК 621.398

DOI 10.18522/2311-3103-2020-7-143-151

О.В. Ершова, Е.В. Кириченко, М.С. Кочерга, Е.А. Семерников

МАСШТАБИРОВАНИЕ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ДАННЫХ В РВС ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ДАЛЬНОСТНО-СКОРОСТНОГО ПОРТРЕТА

Данная статья посвящена вопросу предотвращения переполнений разрядной сетки в высокопроизводительных реконфигурируемых вычислительных системах (РВС) на основе ПЛИС, приводящих к фатальным ошибкам обработки данных в процессе получения радиолокационного дальностно-скоростного портрета (ДСП) цели. Кратко рассмотрены существующие способы решения данной проблемы, и предложена методика априорного определения количества точек масштабирования в конвейерно-параллельных вычислительных структурах, формирующих радиолокационный ДСП цели. Данная методика позволяет заранее определить необходимое количество масштабирований на всех этапах обработки целочисленных данных и предотвратить переполнения при вычислении БПФ (ОБПФ) во всех возможных ситуациях. Рассмотрен алгоритм получения ДСП из исходной сигнальной матрицы (ИСМ) на примере радиолокационной системы (РЛС) непрерывного излучения с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Приведены формулы, позволяющие рассчитать максимально допустимое значение (в используемой разрядной сетке) амплитуды преобразуемых сигналов на всех этапах получения ДСП и количество итераций с масштабированием в процедурах БПФ (ОБПФ). Представлен численный пример расчета количества масштабирований для всех этапов алгоритма формирования ДСП, в котором определено необходимое число итераций с масштабированием при вычислении быстрой свертки и доплеровской скорости (с учетом умножения на оконную функцию), позволяющее предотвратить возможный выход значений сигнала за пределы разрядной сетки. В результате установлено, что предлагаемый способ расчета количества масштабирований позволяет избежать чрезмерного падения уровня сигнала на выходе обработки и снизить отношение ошибок цифровой обработки к уровню сигнала дальностно-скоростной матрицы.

Масштабирование; дальностно-скоростной портрет; быстрое преобразование Фурье; реконфигурируемые вычислительные системы; цифровая обработка сигналов; линейная частотная модуляция.

O.V. Ershova, E.V. Kirichenko, M.S. Kocherga, E.A. Semernikov

SCALING OF INTEGER DATA IN RECONFIGURABLE COMPUTER SYSTEMS WHEN CALCULATING A RADAR RANGE-VELOCITY PORTRAIT

This article deals with the question of preventing overflows of the bit grid in high-performance reconfigurable computing systems based on FPGAs, leading to fatal data processing errors when obtaining a radar range-velocity portrait of the target. The known methods of solving this problem are briefly considered. A new method for a priori determination of the number of scaling points in pipeline-parallel computing structures that form the target's radar range-velocity portrait is proposed. This technique allows to determine in advance the required number of scaling points at all stages of integer data processing and to prevent overflows when calculating the

FFT (IFFT) in all possible situations. An algorithm of forming of range-velocity portrait from an initial signal matrix is considered by the example of a continuous-wave radar system with linear frequency modulation (LFM). Formulas for calculating the maximum value of the amplitude of the converted signals at all stages of obtaining the range-velocity portrait and the number of iterations with scaling in the FFT (IFFT) procedures are given. A numerical example of calculating the number of scaling points for all stages of the algorithm of range-velocity portrait formation is presented. In the example the required number of iterations with scaling is determined when calculating the fast convolution and Doppler velocity (taking into account multiplication by the window function). It allows to prevent signal values from going beyond the bounds of the bit grid. As a result, it was found that the proposed method for calculating the number of scaling points avoids an excessive drop in the signal level at the processing output and reduces the ratio of digital processing errors to the signal level of the range-velocity matrix.

Scaling; range-velocity portrait; fast Fourier transform; reconfigurable computer systems; digital signal processing; linear frequency modulation.

Введение. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы (РВС) на основе ПЛИС все чаще находят применение в радиолокации, где требуется обрабатывать большие объемы данных с высоким темпом оцифровки в реальном масштабе времени [1–4].

Одним из примеров такого применения являются РЛС непрерывного излучения с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), широко используемые в современной радиолокации для обнаружения движущихся объектов [5–12]. В таких системах в качестве излучаемого сигнала используется периодическая последовательность непрерывно излучаемых ЛЧМ-импульсов с периодом T_p . Соответственно эхо-сигнал, принимаемый от объекта, также будет представлять собой периодическую последовательность ЛЧМ-импульсов, каждый из которых имеет сдвиг несущей частоты на величину доплеровского смещения частоты и временную задержку τ относительно излученного импульса. Закон изменения частоты излучаемого и принимаемого сигналов представлен на рис 1.

Основными задачами обработки данных в таких РЛС являются обнаружение и оценка параметров движущихся объектов в координатах дальность-скорость [12].

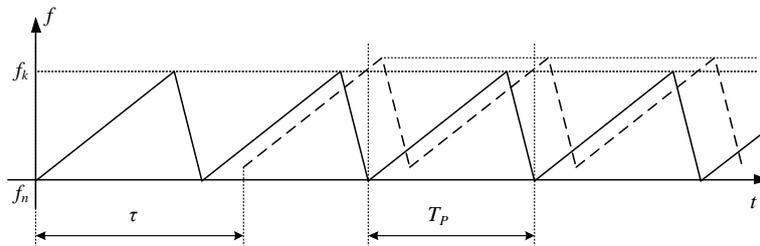


Рис. 1. Закон изменения частоты излучаемого (сплошная линия) и принимаемого (пунктир) сигналов

Для решения задачи оценки дальности и скорости объекта формируется исходная сигнальная матрица (ИСМ), каждая строка которой представляет собой отсчеты отраженного сигнала на интервале приема, равном T_p , а количество строк матрицы рассчитывается из условия обеспечения требуемых характеристик обнаружения. В процессе когерентной обработки принимаемых сигналов с использованием алгоритмов БПФ и ОБПФ происходит преобразование ИСМ в дальностно-скоростной портрет (ДСП), анализируя который можно обнаруживать объекты и оценивать их дальности и скорости.

Поскольку формирование дальностно-скоростного портрета происходит в режиме реального времени и с высокой частотой дискретизации сигналов, то для ускорения расчетов цифровая обработка сигналов производится в целочисленной арифметике. В то же время, согласно теореме Парсеваля, при вычислении дискретного быстрого преобразования Фурье происходит увеличение энергии сигнала. Поэтому в процессе получения ДСП возникает вопрос о предотвращении переполнений разрядной сетки, приводящих к фатальным ошибкам обработки [13, 14].

В общем случае проблема недопущения переполнения решается либо введением обязательного масштабирования на каждом этапе преобразования Фурье, либо с помощью приемов, сводящихся к гибридной плавающей точке [15–19]. Первый способ решения проблемы приводит к возрастанию ошибок цифровой обработки сигналов и уменьшению отношения сигнал/шум на выходе системы обработки. Второй способ требует контроля переполнений на каждой арифметической операции, что снижает быстродействие и усложняет аппаратное обеспечение системы обработки. Более подробно с этими способами можно познакомиться в [20].

Оптимальным решением было бы определение заранее минимального количества масштабирований на всех этапах обработки данных, необходимого и достаточного для отсутствия переполнений. Решению данного вопроса в процессе получения ДСП посвящена эта статья.

Постановка задачи. Для решения вопроса о необходимом и достаточном количестве масштабирований при формировании ДСП рассмотрим алгоритм его получения из ИСМ. Суть алгоритма заключается в следующем. Сначала производится согласованная фильтрация сигналов в каждой строке ИСМ методом быстрой свертки с применением алгоритмов БПФ и ОБПФ. Затем для каждого канала дальности (каждого столбца преобразуемой матрицы) производится узкополосная доплеровская фильтрация с помощью БПФ, которому предшествует умножение столбца на оконную функцию.

Таким образом, преобразование ИСМ в ДСП содержит следующие основные этапы обработки.

1. БПФ по всем строкам ИСМ.
2. Умножение на эталонную функцию $CF(i)$ всех строк матрицы после этапа 1.
3. ОБПФ по всем строкам матрицы после этапа 2.
4. Умножение всех столбцов матрицы на оконную функцию $W(n)$.
5. БПФ по всем столбцам.

Ниже на рис. 2 показана блок-схема преобразования ИСМ в ДСП.



Рис. 2. Блок-схема формирования ДСП

В данной статье при решении вопроса о количестве масштабирований на различных этапах формирования ДСП будем исходить из следующих допущений:

- ♦ зондирующий сигнал является непрерывным периодическим сигналом с периодом повторения T_p , в каждом периоде которого излучается импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в полосе частот ΔF ;

♦ каждая строка сигнальной матрицы содержит сумму отраженных от разных объектов непрерывных сигналов на интервале повторения T_p ; при этом каждый отдельный эхосигнал в строке в общем случае состоит из двух частей, представляющих собой окончание и начало двух смежных периодов отраженных ЛЧМ-импульсов (см. рис. 1);

♦ длина строки сигнальной матрицы N_1 согласована с длительностью периода излучения ЛЧМ-импульсов и соответствует обрабатываемому диапазону дальностей;

♦ одиночному отраженному ЛЧМ сигналу в отсутствие помех в ДСП соответствует точечный отклик как по координате дальности, так и по координате скорости.

Количество итераций с масштабированием в процедурах БПФ и ОБПФ рассчитывается, исходя из требования, что амплитуда преобразуемых сигналов на всех этапах получения ДСП не должна превышать максимально допустимое значение в используемой разрядной сетке. При расчете будем опираться на ранее написанные статьи [21, 22], в которых рассматривались вопросы определения необходимого количества этапов с масштабированием при вычислении БПФ и при быстрой свертке.

Оценка количества итераций с масштабированием при вычислении быстрой свертки по дальности (этапы 1-3). Ранее авторами в статьях [21, 22] было показано, что количество масштабирований в процедурах БПФ и ОБПФ быстрой свертки зависит от энергии сигнала, отношения полосы частот сигнала к частоте дискретизации и от размера БПФ. Однако при расчете не учитывалось влияние энергии спектра эталонного сигнала, с которым производится свертка. Оценим влияние этого фактора на количество итераций с масштабированием.

Для оценки уровня получаемого спектра на этапе 1 исходим из допущений, что размер как принятого, так и излученного сигнала в отсчетах соответствует N_1 – длине строки сигнальной матрицы, а спектр принятого сигнала равномерно распределен в полосе частот ΔF . Значение N_1 равно степени двойки. Энергия принятого сигнала в строке, вычисленная во временной области, после БПФ, согласно теореме Персеваля, возрастает в N_1 раз

$$N_1 \cdot E_0 = E_1, \quad (1)$$

где E_0, E_1 – энергии сигнала до и после БПФ, измеренные во временной и в частотных областях соответственно.

Так как нашей задачей является получение количества масштабирований, достаточное для предотвращения переполнений при вычислении БПФ (ОБПФ) во всех возможных ситуациях, то для получения верхних оценок уровня сигнала на выходе БПФ (ОБПФ) в равенство (1) следует подставлять максимально возможные на этом этапе значения входного сигнала.

Обозначим M_p максимальные уровни сигнала, получаемые в отсутствии масштабирований на p -м этапе обработки, а A_1, A_2 – максимально возможные уровни вещественных сигналов, представимых в разрядной сетке для данных ИСМ и данных ДСП соответственно. Тогда, учитывая, что спектр сигнала сосредоточен в полосе частот ΔF , из уравнения (1) получим

$$N_1 \cdot (N_1 \cdot A_1^2) = \frac{\Delta F}{F_d} \cdot N_1 \cdot M_1^2$$

и далее

$$M_1 = \sqrt{\frac{F_d}{\Delta F} \cdot N_1 \cdot A_1},$$

где F_d – частота дискретизации.

Так как значение M_1 показывает средний уровень спектра в полосе, то возникает необходимость учета возможной неравномерности спектра. Для этого можно ввести корректирующий множитель $K > 1$, который для ЛЧМ сигнала можно принять равным 1,2. Учитывая фактор неравномерности спектра, можно определить количество итераций БПФ с масштабированием для блока 1

$$R_1 = \min \left\{ \log_2(N_1), \max \left[0, \text{ceil} \left[\log_2 \left(\frac{K \cdot \sqrt{\frac{F_d}{\Delta F} \cdot N_1 \cdot A_1}}{A_2} \right) \right] \right] \right\}. \quad (2)$$

Максимальное значение энергии сигнала в строке после БПФ с количеством масштабирований R_1 станет равным $N_1 \cdot N_1 \cdot A_1^2 \cdot \frac{1}{2^{2 \cdot R_1}}$.

Для расчета количества итераций ОБПФ с масштабированием R_3 сначала требуется определить максимально возможное значение на выходе свертки. Этому случаю соответствует полное тождество отраженного и излучаемого сигналов, в результате чего на выходе свертки получается единственный пик, местоположение которого соответствует дальности обнаружения объекта. Уровень этого пика можно рассчитать из неравенства Коши–Буняковского. Из этого неравенства следует, что величина квадрата модуля произвольного m -го отсчета $D(m)$ в строке после ОБПФ с учетом умножения спектра $S(i)$ на эталонную функцию $CF(i)$ не может превосходить значение произведения их энергий

$$|D(m)|^2 = \left| \sum_{i=0}^{N_1-1} CF(i) \cdot e^{\frac{j2\pi mi}{N_1}} \cdot S(i) \right|^2 \leq \sum_{i=0}^{N_1-1} |CF(i)|^2 \cdot \frac{N_1^2 \cdot A_1^2}{2^{2 \cdot R_1}}.$$

Будем считать, что значения эталонной функции $CF(i)$ нормированы к единице. Влияние эталонной функции можно учесть с помощью корректирующего множителя C_{CF}

$$C_{CF} = \sum_{i=0}^{N_1-1} |CF(i)|^2.$$

Таким образом, в отсутствие масштабирований максимально достижимый уровень сигнала после свертки по дальности на этапе 3 можно определить из соотношения

$$M_3 = \frac{N_1 \cdot \sqrt{C_{CF}} \cdot A_1}{2^{R_1}}.$$

Определив M_3 , можно легко рассчитать количество итераций с масштабированием в ОБПФ согласно формуле

$$R_3 = \min \left\{ \log_2(N_1), \max \left(0, \text{ceil} \left[\log_2 \left(\frac{N_1 \cdot A_1 \cdot \sqrt{C_{CF}}}{A_2 \cdot 2^{R_1}} \right) \right] \right) \right\}. \quad (3)$$

В результате масштабирования ОБПФ максимально возможное значение модуля сигнала в преобразуемой матрице после этапа 3 составит $\frac{N_1 \cdot \sqrt{C_{CF}} \cdot A_1}{2^{(R_1+R_3)}}$.

Оценка количества итераций с масштабированием при определении доплеровской скорости. Доплеровская скорость объекта рассчитывается путем вычисления преобразования Фурье для столбцов матрицы ДСП. При этом в целях лучшего разрешения по частоте и уменьшения негативного эффекта подавления сильным сигналом слабых сигналов на этапе 4 (см. рис. 1) следует произвести умножение сигнала в столбце на оконную функцию $W(n)$, $n = 0, N_2 - 1$. Значения оконной функции нормированы к единице.

В статьях [21, 22] авторами рассматривался вопрос определения необходимого и достаточного количества итераций с масштабированием при вычислении БПФ, но без учета умножения входного сигнала на оконную функцию. Здесь произведем оценку количества итераций с масштабированием, во-первых, с учетом умножения на оконную функцию и, во-вторых, основываясь на ранее полученном максимально возможном значении сигнала в столбце.

Определим максимально возможное значение модуля спектральной составляющей матрицы ДСП после БПФ по столбцу (этап 5), воспользовавшись неравенством Коши – Буняковского. Ранее было показано, что максимально возможное значение модуля сигнала в преобразуемой матрице после блока 3 составит $M_3 = \frac{N_1 \cdot \sqrt{C_{CF} \cdot A_1}}{2^{(R_1+R_3)}}$. Из неравенства Коши – Буняковского следует, что квадрат модуля спектральной составляющей $Y(k)$ на этапе 5 после БПФ по столбцу, значения которого равны $P(n) \cdot W(n)$, не может превосходить значение произведения их энергий:

$$|Y(k)|^2 = \left| \sum_{n=0}^{N_2-1} P(n) \cdot e^{j2\pi kn/N_2} \cdot W(n) \right|^2 \leq C_W \cdot N_2 \cdot \frac{N_1^2 \cdot C_{CF} \cdot A_1^2}{2^{2 \cdot (R_1+R_3)}},$$

где C_W – энергия оконной функции:

$$C_W = \sum_{n=1}^{N_2} |W(n)|^2.$$

Отсюда можно рассчитать количество масштабирований на этапе 5 вычисления доплеровской скорости

$$R_5 = \min \left\{ \log_2(N_2), \max \left[0, \text{ceil} \left[\log_2 \left(\frac{N_1 \cdot A_1 \cdot \sqrt{N_2 \cdot C_{CF} \cdot C_W}}{A_2 \cdot 2^{R_1+R_3}} \right) \right] \right] \right\} \quad (4)$$

Пример. В качестве примера был произведен расчет количества итераций с масштабированием согласно формулам (2) - (4) при следующих параметрах: $A_1 = 2^{15}$, $A_2 = 2^{17}$, $N_1 = 2^{14}$, $N_2 = 2^{10}$, $\Delta F/F_d = 0.8$, оконная функция – окно Хэмминга. Был получен следующий результат: $R_1 = 6$, $R_3 = 13$, $R_5 = 9$, позволяющий гарантированно предотвратить возможный выход значений сигнала за пределы разрядной сетки. Сравнивая полученное суммарное количество итераций с масштабированием, равное 28, с количеством масштабирования на каждой итерации БПФ и ОБПФ, равным 38, видим, что предлагаемый способ расчета количества масштабирований позволяет избежать чрезмерного падения уровня сигнала на выходе обработки в 1024 раз и тем самым снизить отношение ошибок цифровой обработки к уровню сигнала дальностно-скоростной матрицы.

Заключение. Предлагаемая методика, используемая при организации высокопроизводительных систем ЦОС, позволяет априори определить количество точек масштабирования (деления на 2) в конвейерно-параллельных вычислительных структурах, формирующих матрицу для обнаружения подвижных объектов в координатах дальность – скорость.

Такое априорное определение необходимого и достаточного количества масштабирований на всех этапах обработки данных является оптимальным решением проблемы недопущения переполнений разрядной сетки, приводящих к фатальным ошибкам обработки.

Применение предложенной методики в системах ЦОС позволяет не только исключить появление избыточных масштабирований, ведущих к чрезмерному падению уровня сигнала на выходе обработки и, соответственно, к уменьшению отношения сигнал/шум, но также избежать снижения быстродействия и усложнения аппаратного обеспечения системы обработки.

Данная методика была использована на практике в реальном изделии и дала положительные результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Левин И.И.* Многопроцессорные вычислительные системы (суперкомпьютеры): состояние и перспективы // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2004. – № 6. – С. 25-44.
2. *Дмитренко Н.Н., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А.* Развитие аппаратной платформы реконфигурируемых вычислительных систем // Тр. Международной суперкомпьютерной конференции: Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи. (Новороссийск, 20-25 сентября 2010 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С. 315-320.
3. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 320 с.
4. *Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А.* Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы нового поколения // Тр. 13-й Международной суперкомпьютерной конференции: Научный сервис в сети Интернет: экзафлопное будущее. (Новороссийск, 19-24 сентября 2011 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2011. – С.42-49.
5. Радиолокационные сигналы для аэрокосмических, оборонных и автомобильных РЛС: сайт. – URL: <https://www.astrosoft.ru/articles/radar/radiolokatsionnye-signalny-dlya-aerokosmicheskikh-oboronnykh-i-avtomobilnykh-rls/> (дата обращения: 20.10.2020).
6. *Asuzu P., Thompson C.* A more exact linear FMCW radar signal model for simultaneous range-velocity estimation // IEEE Radar Conference (RadarConf18). – 2018. – P. 7-11.
7. *Skolnik, Merrill I.* Introduction of Radar Systems, McGraw-Hill Inc. – ISBN - 978007118189, 1962.
8. *Stove A.G.* Linear FMCW radar techniques // Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F. – Oct. 1992. – Vol. 139, Issue 5. – P. 343-350.
9. Дальностно-скоростной портрет (обнаружение) в автомобильных РЛС с непрерывным ЛЧМ-сигналом: сайт. – URL: <https://www.astrosoft.ru/articles/radar/dalnostno-skorostnoy-portret-obnaruzhenie-v-avtomobilnykh-rls-s-nepreryvnym-lchm-signalom/> (дата обращения: 08.11.2020).
10. *Folster F., Rohling H., Lubbert U.* An Automotive radar network based on 77GHz FMCW sensors // Radar Conference, 2005 IEEE International, 9-12 May 2005. – P. 871-876.
11. *Mende R., Rohling H.* A High-Performance AICC radar and results with an experimental vehicle // Radar 97 (Conf. Publ. No. 449), 14.-16.Oct 1997. – P. 21-25.
12. *Geroleo F.G., Brandt-Pearce M.* Detection and Estimation of Multi-Pulse LFM CW Radar Signals // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – Jan. 2012. – Vol. 48, Issue 1. – P. 405-418.
13. *Титов Д.А., Василевский В.В., Косых А.В.* Цифровая обработка сигналов: Методические указания к лабораторным работам. (Омск-2011). – URL: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/departament_quot_radio_devices_and_diagnostic_systems_quot/educational-materials/Digital_signal_processing/Methodical_instructions_to_laboratory_works.pdf. (дата обращения: 08.11.2020).
14. Реализация целочисленного БПФ на ПЛИС: сайт. – URL: <https://habr.com/ru/post/420517/> (дата обращения: 08.11.2020).

15. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
16. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Бином-Пресс, 2011. – 654 с.
17. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: Техносфера, 2012. – 1048 с.
18. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2016. – 992 с.
19. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников: перев. с англ. – М.: Додэка XXI, 2008. – 720 с.
20. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v9.0. Product Guide. Vivado Design Suite. PG109, October 4, 2017. – URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/xfft/v9_0/pg109-xfft.pdf. (дата обращения: 08.11.2020).
21. Ершова О.В., Кириченко Е.В., Семерников Е.А., Чкан А.В. Управление масштабированием данных в процедуре согласованной фильтрации в зависимости от энергии сигнала // Матер. 8-й Всероссийской мультиконференции по проблемам управления МКПУ. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – Т. 3. – С. 92-96.
22. Ершова О.В., Кириченко Е.В., Семерников Е.А., Чкан А.В. Масштабирование данных с фиксированной точкой в процедуре быстрой свертки // Радиотехника. – 2015. – № 4. – С. 66-72.

REFERENCES

1. Kalyaev I.A., Levin I.I. Mnogoprotsessornye vychislitel'nye sistemy (superkomp'yutery): sostoyaniye i perspektivy [Multiprocessor computing systems (supercomputers): state and prospects], *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of computer and information technologies], 2004, No. 6, pp. 25-44.
2. Dmitrenko N.N., Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Razvitiye apparaturnoy platformy rekonfiguriruemyykh vychislitel'nykh sistem [Development of a hardware platform for reconfigurable computing systems], *Tr. Mezhdunarodnoy super-komp'yuternoy konferentsii: Nauchnyy servis v seti Internet: superkomp'yuternye tsentry i zadachi. (Novorossiysk, 20-25 sentyabrya 2010 g.)* [Proceedings of the International Supercomputer Conference: Scientific service on the Internet: supercomputer centers and tasks (Novorossiysk, September 20-25, 2010)]. Moscow: Izd-vo MGU, 2010, pp. 315-320.
3. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoylov V.I. Rekonfiguriruemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury [Reconfigurable multicore computational structures]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2009, 320 p.
4. Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy novogo pokoleniya [High-performance reconfigurable computing systems of a new generation], *Tr. 13-y Mezhdunarodnoy superkomp'yuternoy konferentsii: Nauchnyy servis v seti Internet: ekzaflopsnoe budushchee. (Novorossiysk, 19-24 sentyabrya 2011 g.)* [Proceedings of the 13th International Supercomputer Conference: Scientific Service on the Internet: Exaflops Future. (Novorossiysk, September 19-24, 2011)]. Moscow: Izd-vo MGU, 2011, pp. 42-49.
5. Radiolokatsionnye signaly dlya aerokosmicheskikh, oboronnykh i avtomobil'nykh RLS: sayt [Radar signals for aerospace, defense and automotive radars: website]. Available at: <https://www.astrosoft.ru/articles/radar/radiolokatsionnye-signaly-dlya-aerokosmicheskikh-oboronnykh-i-avtomobilnykh-rls/> (accessed 20 October 2020).
6. Asuzu P., Thompson C. A more exact linear FMCW radar signal model for simultaneous range-velocity estimation, *IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, 2018, pp. 7-11.
7. Skolnik, Merrill I. Introduction of Radar Systems, McGraw-Hill Inc. ISBN - 978007118189, 1962.
8. Stove A.G. Linear FMCW radar techniques // *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, Oct. 1992, Vol. 139, Issue 5, pp. 343-350.
9. Dal'nostno-skorostnoy portret (obnaruzhenie) v avtomobil'nykh RLS s nepreryvnym LCHM-signalom: sayt [Range-velocity portrait in car radars with continuous chirp signal: website]. Available at: <https://www.astrosoft.ru/articles/radar/dalnostno-skorostnoy-portret-obnaruzhenie-v-avtomobilnykh-rls-s-nepreryvnym-lchm-signalom/> (accessed 08 November 2020).
10. Folster F., Rohling H., Lubbert U. An Automotive radar network based on 77GHz FMCW sensors, *Radar Conference, 2005 IEEE International, 9-12 May 2005*, pp. 871-876.

11. *Mende R., Rohling H.* A High-Performance AICC radar and results with an experimental vehicle, *Radar 97 (Conf. Publ. No. 449)*, 14.-16.Oct 1997, pp. 21-25.
12. *Geroleo F.G., Brandt-Pearce M.* Detection and Estimation of Multi-Pulse LFM CW Radar Signals, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Jan. 2012, Vol. 48, Issue 1, pp. 405-418.
13. *Titov D.A., Vasilevskiy V.V., Kosykh A.V.* TSifrovaya obrabotka signalov: Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam (Omsk-2011) [Digital signal processing: Methodological instructions for laboratory work. (Omsk-2011)]. Available at: https://omgtu.ru/general_information/faculties/radio_engineering_department/department_quot_radio_devices_and_diagnostic_systems_quot/educational-materials/Digital_signal_processing/Methodical_instructions_to_laboratory_works.pdf. (accessed 08 November 2020).
14. Realizatsiya tselochislennogo BPF na PLIS: sayt [Implementation of integer FFT on FPGA: website]. Available at: <https://habr.com/ru/post/420517/> (accessed 08 November 2020).
15. *Rabiner L., Gould B.* Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]. Moscow: Mir, 1978, 848 p.
16. *Layons R.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Moscow: Binom-Press, 2011, 654 p.
17. *Oppengeym A., Shafer R.* TSifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 1048 p.
18. *Ayficher E.S., Dzhervis B.U.* TSifrovaya obrabotka signalov: prakticheskiy podkhod [Digital signal processing: a practical approach]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2016, 992 p.
19. *Smit S.* Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoye rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Digital signal processing. A Practical Guide for Engineers and Scientists]; transl. from engl. Moscow: Dodeka XXI, 2008, 720 p.
20. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v9.0. Product Guide. Vivado Design Suite. PG109, October 4, 2017. Available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/xfft/v9_0/pg109-xfft.pdf. (accessed 08 November 2020).
21. *Ershova O.V., Kirichenko E.V., Semernikov E.A., Chkan A.V.* Upravleniye masshtabirovaniem dannykh v protsedure soglasovannoy fil'tratsii v zavisimosti ot energii signala [Data scaling control in the matched filtering procedure depending on the signal energy], *Mater. 8-y Vserossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya MKPU* [Proceedings of the 8th All-Russian multiconference on management problems of the MCPU]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, Vol 3, pp. 92-96.
22. *Ershova O.V., Kirichenko E.V., Semernikov E.A., Chkan A.V.* Masshtabirovaniye dannykh s fiksirovannoy tochkoy v protsedure bystroy svertki [Scaling of fixed-point data in a fast convolution procedure], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2015, No. 4, pp. 66-72.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Ershova Olga Vladimirovna – ООО "НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров"; e-mail: ershova150681@mail.ru; 347900, г. Таганрог, пер. Итальянский, 106; тел.: 88634368177; программист 1 категории.

Kirichenko Elena Viktorovna – e-mail: e.v.kirichenko@yandex.ru; научный сотрудник.

Kocherga Maksim Sergeevich – e-mail: regul105@list.ru; ведущий конструктор.

Semernikov Evgeniy Andreevich – e-mail: semernikov@mvs.tsure.ru; к.т.н., зав. отделом ЦОС.

Ershova Olga Vladimirovna – “Scientific research center of supercomputers and neurocomputers” CoLtd; e-mail: ershova150681@mail.ru; 106, Italyansky lane, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634368177; programmer.

Kirichenko Elena Victorovna – e-mail: e.v.kirichenko@yandex.ru; research engineer.

Kocherga Maksim Sergeevich – e-mail: regul105@list.ru; leading engineer.

Semernikov Evgeniy Andreevich – e-mail: semernikov@mvs.tsure.ru; cand. of eng. sc.; head of department of Digital Signal Processing.