

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.396.969.18

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).847-857

ГРНТИ 49.45.29+47.49.29+28.21.15

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДАРА С ВИРТУАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ НА ПЛАТФОРМЕ DIGILENT ZEDBOARD

Шахов Д. В., Жукова И. Н., Быстров Н. Е.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация Технология MIMO позволяет создавать виртуальные антенные решётки, значительно сокращая количество приемных и передающих каналов по сравнению с классическими фазированными антенными решётками (ФАР). При этом сохраняются характеристики антенной системы (ширина диаграммы направленности, коэффициент усиления) и, как следствие, характеристики радара (угловое разрешение, дальность обнаружения). Уменьшение числа каналов приёма и передачи приводит к значительному снижению стоимости РЛС в целом. В статье описана математическая модель MIMO-радара и ее программная реализация на платформе Digilent Zedboard. Приведены результаты моделирования и отработки аппаратно-программной реализации алгоритма обработки. Дана оценка степени загрузки кристалла Xilinx Zynq XC7Z020, стоящего на платформе Digilent Zedboard.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, технология MIMO, радиолокационный сигнал, корреляционная функция, БПФ, передающие и приёмные антенны, программируемая логическая интегральная схема

Для цитирования: Шахов Д. В., Жукова И. Н., Быстров Н. Е. Разработка программного обеспечения радара с виртуальной антенной решеткой на платформе Digilent Zedboard // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 847-857. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).847-857

Research Article

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR A RADAR WITH A VIRTUAL ANTENNA ARRAY ON THE DIGILENT ZEDBOARD PLATFORM

Shakhov D. V., Zhukova I. N., Bystrov N. E.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract MIMO technology allows you to create virtual antenna arrays, significantly reducing the number of receiving and transmitting channels compared to classical phased antenna arrays (PAA). At the same time, the characteristics of the antenna system (width of the radiation pattern, gain factor) and, as a result, the characteristics of the radar (angular resolution, detection range) are preserved. Reducing the number of receiving and transmitting channels leads to a significant reduction in the cost of the radar as a whole. The article describes the process of developing a mathematical model and signal processing software based on the Digilent Zedboard platform. The results of modeling and testing of the hardware and software implementation of the processing algorithm are presented. The degree of loading of the Xilinx Zynq XC7Z020 crystal standing on the Digilent Zedboard platform is estimated.

Keywords: digital signal processing, MIMO technology, radar signal, correlation function, FFT, transmit and receive antennas, field programmable gate array

For citation: Shakhov D. V., Zhukova I. N., Bystrov N. E. Development of software for a radar with a virtual antenna array on the Digilent Zedboard platform // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 847-857. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).847-857

Введение

Построение активных радиолокационных систем (РЛС) на основе технологии ММО (Multiple Input – Multiple Output), пришедшей из радиосвязи, получило в последнее десятилетие широкое распространение. Принципы радиолокации с несколькими разнесенными передающими и приемными антенными модулями описаны в [1, 2]. Среди отечественных публикаций следует выделить работы В. В. Чапурского [3, 4]. К тому же классу систем относятся и многопозиционные РЛС, весьма подробно описанные работе В. С. Черняк [5].

Сегодня ММО РЛС ведут наземное [6, 7] и морское [8] наблюдение, решают задачи интерферометрии [9], применяются для медицинской визуализации [10], устанавливаются на автомобилях [11, 12].

Особый интерес представляют ММО РЛС с так называемыми совместно (близко) расположенными передающими и приемными антеннами [13], когда применение M передающих и N приемных антенн позволяет синтезировать виртуальную антенную решетку размера $(M \cdot N)$. Схема построения антенной системы в этом случае схожа с разреженной решеткой фазированной антенной решетки, в которой каждый излучатель имеет собственный приемопередающий модуль и собственный аналогово-цифровой преобразователь. Однако, в радиолокаторе с фазированной антенной решеткой каждый элемент излучает копию (возможно, со сдвигом во времени) зондирующего сигнала, который формируется в центральном генераторе сигналов. В ММО РЛС передающие антенны излучают когерентные, но взаимно ортогональные сигналы. Приемные антенны принимают эти сигналы. Каждый эхо-сигнал может быть ассоциирован с соответствующим ему передатчиком. Организация в приемниках отдельных каналов обработки для сигналов передатчиков с последующей межканальной обработкой позволяет решить не только задачи обнаружения с измерением дальности и скорости цели, но и оценить ее угловое положение. В результате, используя меньшее число приемопередающих антенн, удастся получить разрешающую способность, сравнимую с активными фазированными антенными решетками (АФАР). ММО РЛС также стали хорошей альтернативой радиолокационным системам с узкой диаграммой направленности антенны и последовательным сканированием пространства.

Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, не многие публикации описывают специфику технической реализации обработки сигналов в ММО РЛС.

В статье описана программная реализация на платформе Digilent Zedboard ранее разработанной [14] математической модели формирования и обработки сигналов ММО РЛС. Приведены результаты отработки программной реализации и сопоставление полученных результатов с результатами математического моделирования.

Модель формирования и обработки сигналов в ММО РЛС

При использовании технологии ММО возможны различные варианты пространственного расположения M передающих и N приемных антенн, в том числе, описанный в [15] и представленный на рисунке 1.

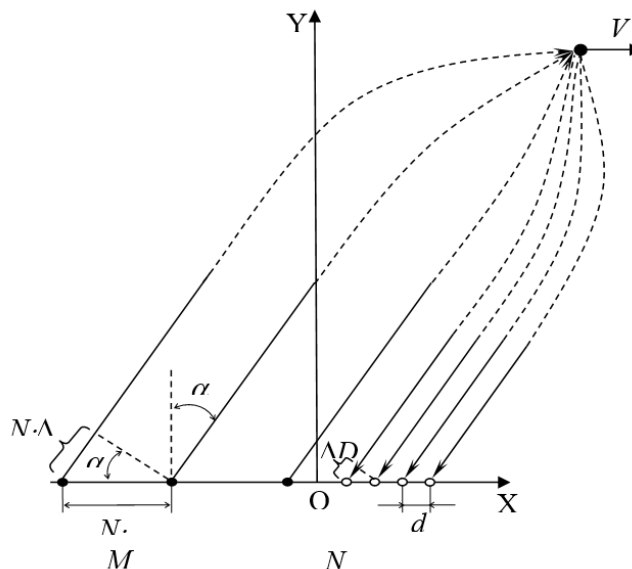


Рисунок 1. Пространственная модель распространения сигналов

В данной модели приемники располагаются на расстоянии d друг от друга. Передатчики – на расстоянии $(d \cdot N)$. Когда цель расположена относительно радиолокационной системы в дальней зоне, можно считать, что все сигналы излучаются и принимаются под одним и тем же углом α .

С каждой (m, n) -ой парой «передатчик - приемник», $m=1..M$, $n=1..N$, может быть ассоциирован сигнал, распространяющийся от m -го передатчика до цели и обратно до n -го приемника.

Разность хода сигналов между двумя соседними приемниками будет равна $\Delta D = d \cdot \sin(\alpha)$. Между крайними приемниками она увеличивается до величины $\Delta D_{\text{ПРМ}} = (N-1) \cdot d \cdot \sin(\alpha)$. Между соседними передатчиками разность хода сигналов составляет $\Delta D_{\text{ПРД}} = N \cdot d \cdot \sin(\alpha) = \Delta D_{\text{ПРМ}} + \Delta D$. Тогда все пары передатчиков и приемников можно расположить в порядке, при котором разность хода сигналов, а следовательно, и набег фазы, будет изменяться по линейному закону. Такое упорядочение образует виртуальную решетку, которая эквивалентна $(M \cdot N)$ приемопередающим антеннам, расположенным на расстоянии d друг от друга. Расстояние между крайними элементами антенной решетки равно $[(M \cdot N - 1) \cdot d]$, что много меньше разрешения по дальности. Изменение набег фаз между сигналами виртуальной решетки позволяет определить угловое положение цели. Для однозначных измерений расстояние d между приемниками должно быть равно половине длины волны. При выполнении данного условия, при любом положении цели разность фаз

сигналов, соотнесенных с соседними элементами виртуальной решетки, будет находиться в диапазоне $[-\pi; \pi]$.

Пусть передатчики, работающие от общего задающего генератора, обеспечивающего когерентность зондирующих сигналов, по очереди излучают фазоманипулированные импульсы, состоящие из 32 элементарных импульсов каждый. τ_0 – длительность элементарного импульса. Между излучениями существуют паузы, когда все передатчики выключены и идет прием отраженных сигналов всеми приемными антеннами. Фрагмент из 512 отсчетов комплексной огибающей сигнала, образованного суммой сигналов всех передатчиков и образующих один период зондирования, $T=512\tau_0$, представлен на рисунке 2. Ортогональность сигналов передатчиков достигается в данном случае временным разделением излучаемых ими сигналов. Отметим, что закон фазовой манипуляции отличен для разных передатчиков и изменяется от импульса к импульсу (от периода к периоду).

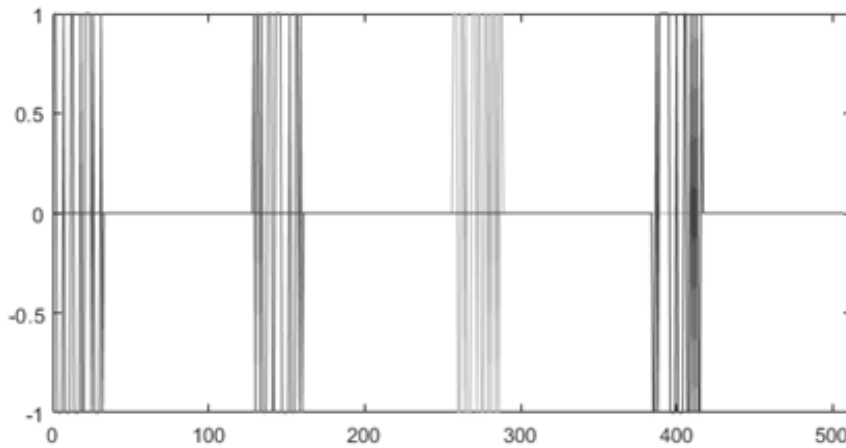


Рисунок 1. Фрагмент комплексных огибающих сигналов передатчиков

Сигнал, принятый каждым приемником, равен аддитивной смеси сигналов всех передатчиков, отраженных от каждой точечной цели. При дискретной обработке эхо-сигналов с частотой дискретизации, определяемой шириной спектра сигналов, влияет только на мгновенное значение фазы эхо-сигналов, так как размер антенной решетки много меньше разрешения по дальности. Дискретные задержки эхо-сигналов k -ой цели одинаковы. Будем полагать их постоянными на длительности когерентного накопления. Тогда комплексные огибающие сигналов, $s_n(t)$, $n=1..N$, отраженных от K точечных целей, описываются выражением:

$$s_n(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M A_k \cdot u_m(t - \tau_k) \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} D_{m,n,k}(t) \right] + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где A_k , τ_k – комплексная амплитуда и задержка сигналов k -ой цели, $u_m(t)$ – сигнал m -ого передатчика, $\varepsilon(t)$ – белый шум. $D_{m,n,k}(t)$ – расстояние распространения сигналов от m -го передатчика до k -ой движущейся цели и обратно до n -ого приемника.

Отметим, что $D_{m,n,k}(t)$ также описывает изменение во времени мгновенного значения фазы сигнала, вызванного перемещением цели с некоторой скоростью.

Обобщенная функциональная схема обработки сигналов по технологии ММО, представлена на рисунке 3.

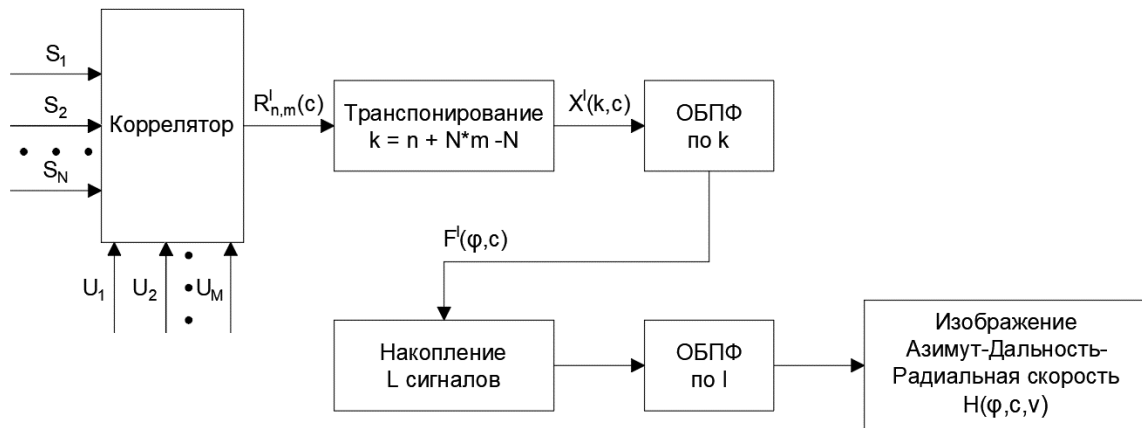


Рисунок 3. Функциональная схема модели обработки сигналов в ММО-радаре

Алгоритм обработки содержит несколько этапов:

1) Сжатие на корреляторе отдельных периодов длительностью T эхосигналов M передатчиков, принятых N приемниками.

$$R_{n,m}^l(c) = \int_0^T s_n(t + l \cdot T) u_m(t + l \cdot T - \tau_c), \quad (2)$$

где τ_c – дискретная задержка c -ого дальномерного канала, $c=1..C$.

После обработки l -ого периода зондирования, $l=0..V-1$ получается объем данных, равный $(M \cdot N \cdot C)$.

2) Транспонирование потока данных так, чтобы для одноименных задержек располагались в порядке набега фазы элементов виртуальной антенной решетки $R_{n,m}^l(c) \rightarrow X^l(k, c)$, где $k=n+Nm-N$

3) Обратное преобразование Фурье над одноименными по c значениями $X^l(k, c)$:

$$F^l(\varphi, c) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{M \cdot N - 1} X^l(k, c) \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{M \cdot N} \varphi \cdot k \right], \quad \varphi=0..(M \cdot N - 1). \quad (3)$$

Модуль функции $F^l(\varphi, c)$ образует радиолокационное изображение «Азимут-Дальность» для l -ого периода зондирования. При этом

$$\alpha = \begin{cases} \arcsin \left(\frac{\lambda}{d \cdot M \cdot N} \varphi \right), & \varphi < \frac{M \cdot N}{2} \\ \arcsin \left(\frac{\lambda}{d \cdot M \cdot N} \varphi - 2 \right), & \varphi \geq \frac{M \cdot N}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Угловое разрешение ухудшается по мере удаления от оси визирования ($\alpha=0$). Наименьшее угловое разрешение $\alpha_{\min}=\arcsin[\lambda/(d \cdot M \cdot N)]$ составит 7.18° при $d=\lambda/2$ и $(M \cdot N)=16$.

4) После обработки согласно (3) V периодов зондирования выполнение обратных преобразований Фурье над одноименными по (φ, c) значениями $F^l(\varphi, c)$

$$H(\varphi, c, v) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} F^l(\varphi, c) \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{V} v \cdot l \right], v=0 \dots V-1 \quad (5)$$

Модуль $H(\varphi, c, v)$ образует радиолокационное изображение «Азимут-Дальность-Радialная скорость»

Пример изображения при обнаружении трех движущихся с разными скоростями целей, расположенных на разных дальностях и пеленгах, изображен на рисунке 4. На рисунке 5 представлены проекции трехмерного изображения на плоскости «Азимут-Дальность» (рисунок 5 а) и «Радialная скорость-Дальность» (рисунок 5 б).

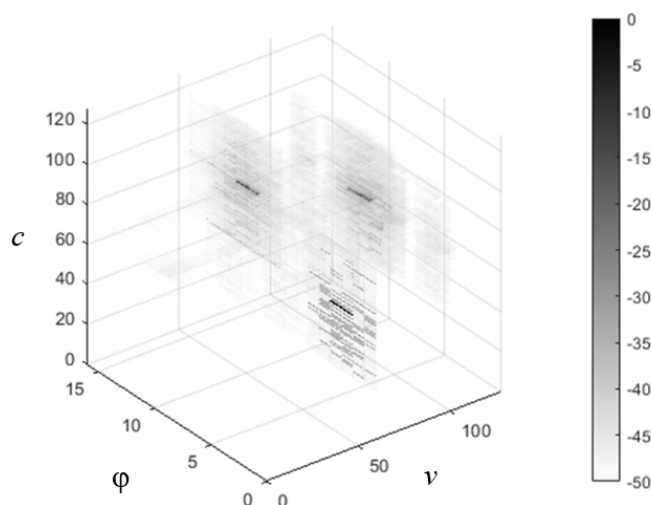


Рисунок 4. Изображение «Азимут-Дальность-Радialная скорость»

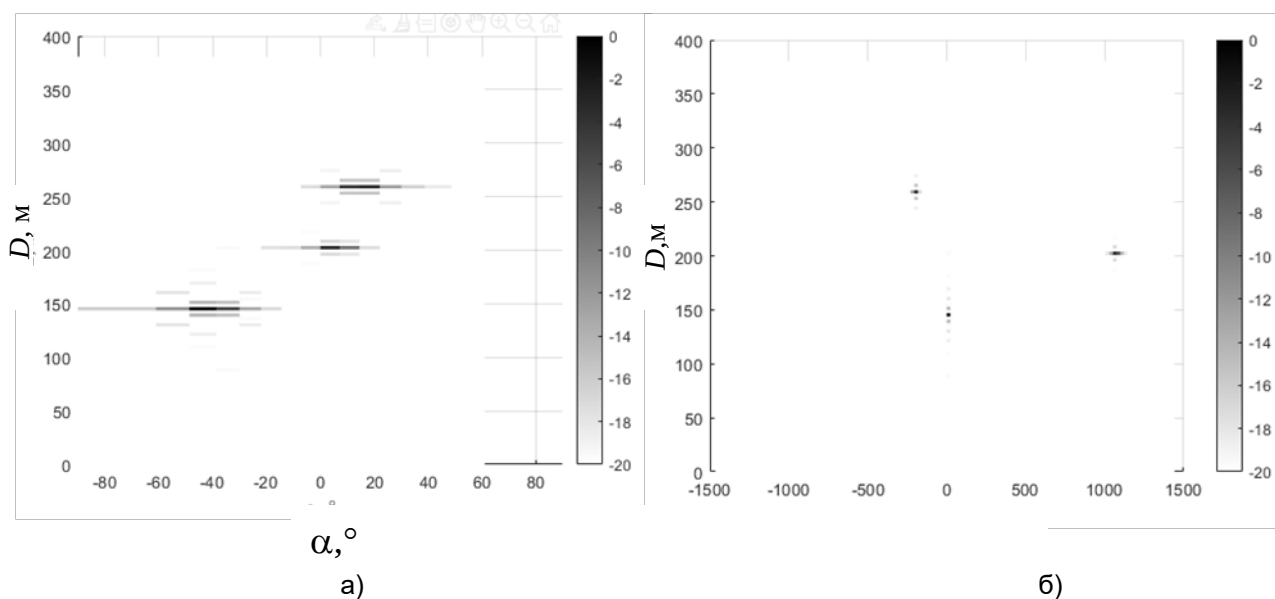


Рисунок 5. Проекции трехмерного изображения: а) изображение «Азимут-Дальность»; б) изображение «Радialная скорость-Дальность»

Разработанная программная модель является основой планируемой аппаратно-программной реализации ММО-радаров, позволяющего строить радиолокационные изображения обнаруживаемого объекта на плоскости «Радиальная скорость-Дальность» и плоскости «Азимут – Дальность».

Реализация модели обработки сигналов ММО-радаром на платформе Digilent ZedBoard

Рассмотренный выше алгоритм был реализован на стандартной отладочной платформе Digilent ZedBoard, включающей систему на кристалле Xilinx Zynq XC7Z020, [16]. Основные характеристики логической части:

- 1) количество программируемых логических ячеек – 85 тысяч;
- 2) объем оперативной памяти – 4,9 Мбит;
- 3) количество ячеек цифровой обработки сигналов (ячеек DSP) с 25×18 битным умножителем, 48 битным аккумулятором и предварительным сумматором – 220.

Основные характеристики процессорной части:

- 1) 2-ядерный ARM Cortex-A9 CoreSight с частотой тактирования до 866 МГц;
- 2) общее количество контактов ввода-вывода – 54;
- 3) количество каналов DMA – 8.

Типовые вычислительные операции, которые необходимо реализовать: сжатие периодов принятого сигнала и запись-чтение результатов с хранением до момента, когда будут подготовлен необходимый объем данных для вычисления быстрых преобразований Фурье (БПФ) требуемой размерности.

Быстродействие платы позволяет реализовать обработку на одной платформе сразу для четырех приемников. При этом все вычисления необходимо производить на частоте, в четыре раза большей частоты дискретизации принятого сигнала.

Данные представлены в памяти как действительная и мнимая части комплексного числа, каждая из которых является вещественным числом с плавающей точкой одинарной точности.

Отсчеты сигнала активного, излучающего в данный момент передатчика, а также сигналов приемников загружаются в блочную память (BRAM) объемом 5х36 Кбит. Функциональная схема алгоритма обработки изображена на рисунке 6.

С целью экономии вычислительных ресурсов корреляцию сигналов приемников целесообразно выполнять в частотной области. Над загруженными в память BRAM отсчетами выполняется БПФ размерности 128. Спектры входных сигналов приемников и опорного сигнала активного передатчика по очереди перемножаются. Выполняются обратные БПФ. Результаты записываются в BRAM. Объем BRAM рассчитан на заполнение результатов сжатия импульсов 4-х передатчиков в 4-х приемниках, т. е. 16-ти каналов виртуальной антенной решетки.

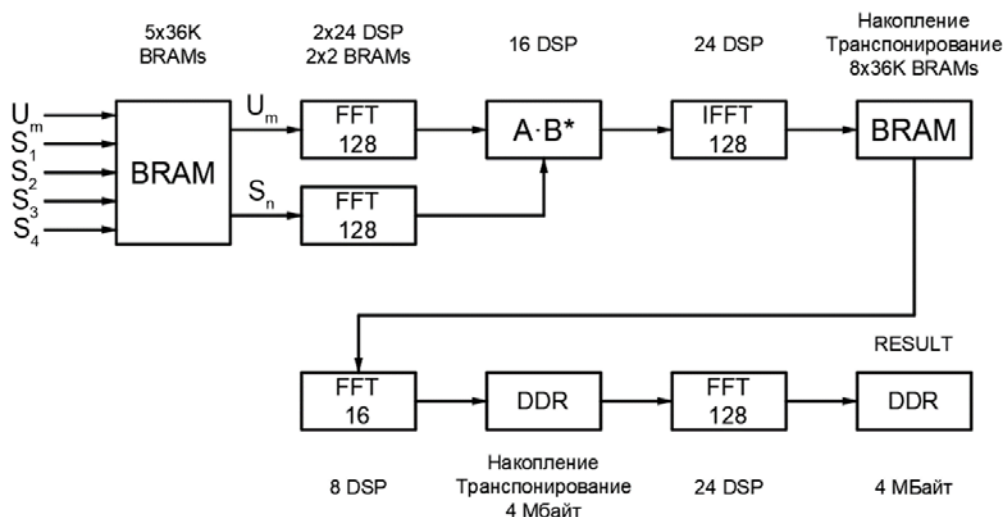


Рисунок 6. Функциональная схема алгоритма обработки на платформе Digilent ZedBoard

Затем выполняется БПФ размерности 16 над одноименными по задержке результатами сжатия сигналов в каналах виртуальной антенной решетки. Таким образом, получается радиолокационное изображение «Азимут – Дальность»

Для вычисления радиальной скорости необходимо произвести формирование слоёв данных изображений «Азимут – Дальность». Для хранения 128 таких изображений требуется 4 Мб памяти, что превышает доступное значение BRAM. В связи с этим накопление данных происходит в DDR. После чего производится БПФ над одноименным по азимуту и дальности данными. В результате получается радиолокационное изображение «Азимут – Дальность – Радиальная скорость», которое так же сохраняется в DDR, для дальнейшего использования.

Для отладки отсчеты модулирующих последовательностей $u_m(t)$, а также отсчеты комплексных огибающих входных сигналов приемников $s_n(t)$, вычисленные заранее, могут считываться из внешней памяти DDR платформы.

Оценим степень загрузки кристалла Xilinx Zynq XC7Z020. Реализация алгоритма обработки потребовала использовать:

- 1) 120 блоков DSP, из которых 24·4 блока израсходовано на выполнение БПФ размерности 128; 8 блоков – на выполнение БПФ размерности 16; 16 блоков – на умножение двух комплексных чисел;
- 2) 20,5 блоков BRAM, из которых 5 блоков потребовалось для накопления 128 отсчётов переданного и принимаемых сигналов; 2·2 блоков необходимы для записи-чтения результатов вычисления БПФ; 8 блоков BRAM – для организации вычислений 16 корреляционных функций, 3,5 блока израсходованы на прочие ядра.
- 3) 8 Мбайт внешней памяти DDR для хранения промежуточных и окончательных вычислений.

Описанный алгоритм обработки сигналов MIMO РЛС для платформы Digilent ZedBoard реализован в программе Xilinx Vivado.

Проверка работоспособности проверялась на отраженных сигналах, сформированных в ходе моделирования в примере рисунков 4, 5. Сигнальные последовательности были загружены в память DDR. Оттуда данные в реальном времени, с частотой 50 МГц, подавались на вход алгоритма обработки. Результат работы алгоритма полностью совпал с результатами, полученными в ходе моделирования.

Заключение

Аппаратно-программная реализация на стандартной отладочной платформе Digilent ZedBoard продемонстрировала возможность реализации на одном кристалле обработки сигналов ММО РЛС. Степень загруженности кристалла позволит в дальнейшем разработать макетный образец устройства обработки сигналов с рабочими параметрами системы.

Список литературы

1. Fishler E., Haimovich A., Blum R., Chizhik D., Cimini L., Valenzuela R. MIMO radar: An idea whose time has come // Proceedings of the IEEE Radar Conference, 26–29 April 2004. Philadelphia, 2004. P. 71-78. DOI: 10.1109/NRC.2004.1316398
2. Forsythe K. W., Bliss D. W., Fawsett G. S. Multiple-input multiple output (MIMO) radar: Performance issues // Conference Record of the Thirty-Eight Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2004, 7–10 Nov. Pacific Grove (CA), 2004. 1. 310-315. DOI: 10.1109/ACSSC.2004.1399143
3. Чапурский В. В. Функции неопределенности и пространственная разрешающая способность сверхширокополосных видеоимпульсных антенных решеток // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2005. 4. 94-108.
4. Чапурский В. В. Обработка сигналов в многочастотных радиолокационных системах антеннами из пространственно-распределенных передающих и приемных элементов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2008. 3. 69-79.
5. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. Москва: Радио и связь, 1993. 415 с.
6. Lesturgie M. Some relevant applications of MIMO to radar // IEEE Proceedings of the 2011 12th International Symposium on Radar (IRS), September 7-9, 2011. Leipzig, Germany, 2011. P.714-721.
7. Martinez-Vazquez A., Fortuny-Guasch J. UWB MIMO radar arrays for small area surveillance applications // 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), 11-16 Nov. 2007. Edinburgh, UK, 2007. P. 1-6. DOI: 10.1049/ic.2007.1076
8. Anderson S., Anderson W. A MIMO technique for enhanced clutter selectivity in a multiple scattering environment: Application to HF surface wave radar // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 20-24 September 2010. Sydney, Australia, 2010. P. 133-136. DOI: 10.1109/ICEAA.2010.5652215
9. Kim J.-H., Ossowska A., Wiesbeck W. Investigation of MIMO SAR for interferometry // European Radar Conference, 10-12 October 2007. Munich, Germany, 2007. P. 51-54. DOI: 10.1109/EURAD
10. Pancera E., Zwick T., Wiesbeck W. Ultra wideband radar imaging: An approach to monitor the water accumulation in the human body // IEEE International

Conference on Wireless Information Technology and Systems, 28 August 2010-03 September. Honolulu, USA, 2010. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICWITS.2010.5611899

11. Lutz S., Baur K., Walter T. 77 GHz lens-based multistatic MIMO radar with collocated antennas for automotive applications // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 17-22 June 2012. Montreal, Canada, 2012. P. 1-3. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259526

12. Schuler K., Younis M., Lenz R., Wiesbeck W. Array design for automotive digital beamforming radar system // IEEE International Radar Conference, 09-12 May 2005. Arlington, USA, 2005. P. 435-440. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435864

13. Li J., Stoica P. MIMO radar with colocated antennas // IEEE Signal Processing Magazine. 2007. 24(5). 106-114. DOI: 10.1109/MSP.2007.904812

14. Шахов Д. В., Крюков Д. В. Обработка сигналов при работе РЛС по технологии МИМО // Дни науки и инноваций НовГУ: материалы XXVIII научной конференции преподавателей, аспирантов и студентов НовГУ, Великий Новгород, 05–10 апреля 2021 года: 2-х ч. Ч. 2. Великий Новгород: Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, 2021. С. 286-292. DOI: 10.34680/978-5-89896-757-4/2021.DN-2.49

15. Zhu Y., Su Y., Yu W. An ISAR Imaging Method Based on MIMO Technique // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. 48(8). 3290-3299. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2045230

16. Калачёв А. Многоядерная конфигурируемая вычислительная платформа Zynq-7000 // Современная электроника. 2013. 1. 22-31.

References

1. Fishler E., Haimovich A., Blum R., Chizhik D., Cimini L., Valenzuela R. MIMO radar: An idea whose time has come // Proceedings of the IEEE Radar Conference, 26–29 April 2004. Philadelphia, 2004. P. 71-78. DOI: 10.1109/NRC.2004.1316398

2. Forsythe K. W., Bliss D. W., Fawsett G. S. Multiple-input multiple output (MIMO) radar: Performance issues // Conference Record of the Thirty-Eight Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2004, 7–10 Nov. Pacific Grove (CA), 2004. 1. 310-315. DOI: 10.1109/ACSSC.2004.1399143

3. Chapurskii V. V. Funktsii neopredelennosti i prostranstvennaia razreshaiushchaia sposobnost' sverkhshirokopolosnykh videoimpul'snykh antennoykh reshetok [Uncertainty functions and spatial resolution of ultra wideband video pulse array antennas] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2005. 4. 94-108.

4. Chapurskii V. V. Obrabotka signalov v mnogochastotnykh radiolokatsionnykh sistemakh v antennami iz prostranstvenno-raspredelennykh peredaiushchikh i priemnykh elementov [Signal processing in multi-frequency radiolocation systems having antennae with spatially distributed transmitting and receiving elements] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2008. 3. 69-79.

5. Cherniak V. S. Mnogopozitsionnaia radiolokatsiia [Multilevel radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 415 p.

6. Lesturgie M. Some relevant applications of MIMO to radar // IEEE Proceedings of the 2011 12th International Symposium on Radar (IRS), September 7-9, 2011. Leipzig, Germany, 2011. P.714-721.

7. Martinez-Vazquez A., Fortuny-Guasch J. UWB MIMO radar arrays for small area surveillance applications // 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), 11-16 Nov. 2007. Edinburgh, UK, 2007. P. 1-6. DOI: 10.1049/ic.2007.1076

8. Anderson S., Anderson W. A MIMO technique for enhanced clutter selectivity in a multiple scattering environment: Application to HF surface wave radar // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 20-24 September 2010. Sydney, Australia, 2010. P. 133-136. DOI: 10.1109/ICEAA.2010.5652215
9. Kim J.-H., Ossowska A., Wiesbeck W. Investigation of MIMO SAR for interferometry // European Radar Conference, 10-12 October 2007. Munich, Germany, 2007. P. 51-54. DOI: 10.1109/EURAD
10. Pancera E., Zwick T., Wiesbeck W. Ultra wideband radar imaging: An approach to monitor the water accumulation in the human body // IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, 28 August 2010-03 September. Honolulu, USA, 2010. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICWITS.2010.5611899
11. Lutz S., Baur K., Walter T. 77 GHz lens-based multistatic MIMO radar with collocated antennas for automotive applications // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 17-22 June 2012. Montreal, Canada, 2012. P. 1-3. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259526
12. Schuler K., Younis M., Lenz R., Wiesbeck W. Array design for automotive digital beamforming radar system // IEEE International Radar Conference, 09-12 May 2005. Arlington, USA, 2005. P. 435-440. DOI: 10.1109/RADAR.2005.1435864
13. Li J., Stoica P. MIMO radar with colocated antennas // IEEE Signal Processing Magazine. 2007. 24(5). 106-114. DOI: 10.1109/MSP.2007.904812
14. Shakhov D. V., Kriukov D. V. Obrabotka signalov pri rabote RLS po tekhnologii MIMO [Signal processing in MIMO radar] // Dni nauki i innovatsii NovGU: materialy XXVIII nauchnoi konferentsii prepodavatelei, aspirantov i studentov NovGU [Proc. 28th Sci. Conf. of Academicians and Students "Science and Innovation Days at NovSU"]. In 2 vols. Vol. 2, Veliky Novgorod, NovSU Publ., 2021. P. 286-292. DOI: 10.34680/978-5-89896-757-4/2021.DN-2.49
15. Zhu Y., Su Y., Yu W. An ISAR Imaging Method Based on MIMO Technique // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. 48(8). 3290-3299. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2045230
16. Kalachev A. Mnogoiadernaia konfiguriruemaia vychislitel'naia platforma Zynq-7000 [Zynq-7000 multicore configurable computing platform] // Sovremennaya elektronika. 2013. 1. 22-31.

Информация об авторах

Шахов Денис Валерьевич – студент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0005-9594-9925, Denis.Shakhov@novsu.ru

Жукова Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-0283-3711, Irina.Zhukova@novsu.ru

Быстров Николай Егорович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-1998-8868, Nikolay.Bystrov@novsu.ru