

УДК 621.396.962.2

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМА «ДОЛ» НА ПОДВИЖНОМ СТЕНДЕ: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ РАДИОВИДЕНИЯ

*Валуйский Д.В., магистрант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) Рязанского государственного радиотехнического университета (РГРТУ);*

*Витязев С.В., к.т.н., доцент кафедры ТОР РГРТУ, e-mail: vityazev.s.v@rsreu.ru;*

*Андросов В.В., главный конструктор АО «ГРПЗ»;*

*Харин А.В., аспирант кафедры ТОР РГРТУ;*

*Витязев В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТОР РГРТУ, e-mail: vityazev.v.v@rsreu.ru.*

## THE RESULTS OF REAL-LIFE EXPERIMENTS WITH DOPPLER SHARPENING ALGORITHMS AND SOFTWARE: THE ANALYSIS OF PHASE ERRORS IN RADAR IMAGING SYSTEMS

*Valuyskiy D.V., Vityazev S.V., Androsov V.V., Harin A.V., Vityazev V.V.*

*The problem of autofocus in radar imaging systems is considered in this paper. The efficiency of one of the most popular autofocus techniques – PGA – is investigated for the implementation in a given system. The possibility of PGA autofocus is analyzed for the objects of different nature. The conclusion about PGA efficiency in case of such objects are made.*

**Key words:** radar imaging, phase errors, autofocus, PGA.

**Ключевые слова:** радиовидение, фазовые ошибки, автофокусировка, PGA.

### Введение

Система радиовидения с компенсацией нелинейных фазовых ошибок предназначена для формирования радиолокационного изображения земной поверхности в режимах доплеровского обужения луча (ДОЛ). Заданное разрешение по азимуту достигается за счет движения носителя РЛС и специальных методов обработки отраженного сигнала [1-3]. В процессе движения имеют место неустойчивости носителя, вследствие чего при обработке траекторного сигнала возникают нелинейные фазовые ошибки. Система радиовидения с компенсацией нелинейных фазовых ошибок позволяет достигать заданного разрешения радиолокационного изображения по азимуту в условиях неустойчивости параметров движения носителя. Специальная процедура обработки, позволяющая устранить фазовые ошибки, получила название автофокусировки.

Проблема автофокусировки известна давно, и к настоящему моменту сложилось несколько направлений ее решения [4-9]. Одним из наиболее широко распространенных подходов является автофокусировка по оценке градиента фазы (Phase gradient autofocus – PGA) [10, 11]. В работах [12-15] метод PGA используется при разработке системы радиовидения с заданными условиями применения. Высокая неустойчивость используемой платформы выводит эффективность процедуры автофокусировки на первый план. Алгоритмы обработки и формирования изображений отрабатываются на моделях сигналов, а также на тестовых записях, в основу которых положены искусственно помещаемые на рассматриваемую

*Рассматривается проблема автофокусировки в системах радиовидения с синтезируемой апертурой антенны. Исследуется эффективность одного из наиболее известных методов автофокусировки PGA для условий конкретной технической задачи. Исследуется возможность автофокусировки методом PGA по объектам различной природы. Делаются выводы об эффективности метода PGA для сцен, содержащих такие объекты.*

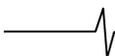
сцену объекты, такие как уголкового отражатели заданной конфигурации. Показана высокая эффективность разработанных решений [14, 15]. В то же время является очевидным, что качество автофокусировки будет сильно зависеть от характера отражений от объектов естественно присутствующих в зоне обзора РЛС. Это могут быть отражения от растительности, построек, техники, других предметов и объектов на местности.

В данной работе описываются натурные испытания, целью которых явился анализ эффективности автофокусировки радиоизображений методом PGA в зависимости от отражателей разной природы происхождения.

### Описание условий эксперимента

Для проведения натурных испытаний программно-алгоритмического обеспечения режимов радиовидения использован подвижный экспериментальный стенд. Стенд реализован на базе автомобиля с установленной на нем радиолокационной станцией, а также аппаратурой записи и регистрации сигналов. Запись сигналов для дальнейшего исследования и анализа требует выбора сцены с определенными параметрами, а также соответствующих условий записи: угол наклона антенны, угол обзора, интервал синтезирования и др.

Одним из ключевых параметров сцены является



наличие отражателей разной природы происхождения: искусственно созданных человеком объектов (строений), а также объектов живой (растительность) и неживой (холмы, береговые линии, неровности местности) природы. Кроме того, требуется наличие ровной поверхности – дороги для возможности обеспечения стабильной скорости движения стенда при записи сигналов, что необходимо для повышения точности получаемой навигационной информации.

С этой целью проведен поиск сцены натуральных испытаний для записи тестовых сигналов. По спутниковым снимкам местности были подобраны несколько мест, которые могли бы удовлетворять заданным требованиям. По результатам работы наилучшим вариантом был признан вариант участка дороги, представленный на рис. 1. Достоинствами данного варианта являются наличие протяженного прямого участка дороги с ровным асфальтовым покрытием, наличие как построек, так и объектов живой и неживой природы, а также возможность размещения в рамках сцены уголкового отражателя.

Запись сигналов производилась для сцен двух видов: с величиной сектора обзора 12 и 48 градусов при дальностях записи соответственно 500 и 2500 метров. Сцена меньшего размера использовалась для отработки механизма записи и анализа эффективности увеличения интервала синтезирования апертуры антенны. Сцена с дальностью записи 2500 метров и сектором сканирования 48 градусов позволяет провести по записанным сигналам анализ эффективности автофокусировки и компенсации нелинейных фазовых искажений для объектов различной природы происхождения.



Рис. 1. Местность для записи сигналов в режиме «ДОЛ»

При записи сигналов для сцены второго типа использовалась методика, представленная на рис. 2. Подвижный стенд движется в указанном стрелкой направлении по дороге с постоянной скоростью 11 м/с. Запись сигнала ведется в выделенном на рис. 2 секторе с интервалом синтезирования апертуры антенны 400 мс. В рамках записываемой сцены наибольший интерес представляет группа строений в центре, а также расположенная правее металлическая постройка. При записи некоторых сигналов использовались уголкового отражатели, место-

положение которых отмечено на рис. 2 треугольником.



Рис. 2. Сцена записи сигналов

Параметры записи: сектор азимутального обзора 48 градусов, скорость движения 40 км/ч, направление антенны 35 градусов, в вертикальной плоскости антенна поднята на 0,7 градуса, длина волны несущего колебания 8 мм, частота повторения импульсов 250 Гц, диапазон дальностей от 270 м до 2410 м.

#### Формирование РЛИ в режиме реального луча

В режиме реального луча РЛИ формируется на основании мощности принимаемого отраженного от объектов сигнала. Достоинством такого режима является простота алгоритма обработки, не требующая вычисления и применения компенсирующих функций. К недостаткам следует отнести отсутствие фокусировки, и как следствие, «размазанность» изображения.

В рамках проведенного исследования формирование радиолокационного изображения в режиме реального луча производилось с целью определения качества записи сигнала: на основании сформированного в режиме реального луча радиолокационного изображения принималось решение о пригодности или непригодности рассматриваемой записи сигнала для дальнейших исследований. Для исследований были выбраны записи сигналов с наиболее четко выраженным одним уголкового отражателем (рис. 3), а также с двумя близко расположенными уголкового отражателями (рис. 4.) для проверки возможности их азимутального разрешения.



Рис. 3. Радиолокационное изображение в режиме реального луча. Сигнал с одним уголкового отражателем

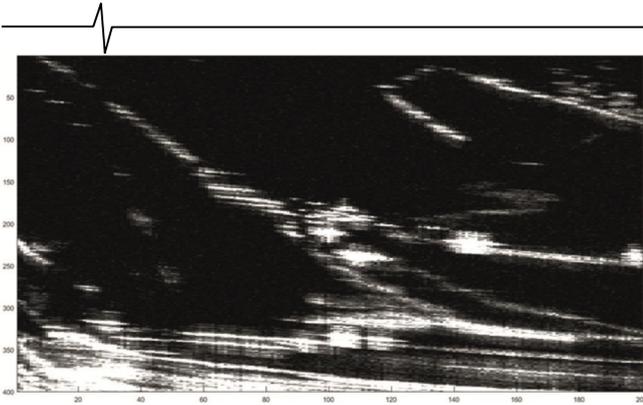


Рис. 4. Радиолокационное изображение в режиме реального луча. Сигнал с двумя близкорасположенными уголковыми отражателями

Помимо оценки качества записи, анализ радиолокационного изображения, сформированного в режиме реального луча, позволяет выделить представляющие наибольший интерес в рамках исследований каналы дальности рассматриваемого сигнала. Так, для сигнала, представленного на рис. 3, наибольший интерес представляют парциальные кадры №№ 45...48, содержащие уголковый отражатель, а также объекты неживой природы и постройки №№ 58:61 (металлическое строение), а также парциальный кадр № 30 для исследования сигналов, отраженных от объектов живой природы (рис. 5). Для радиолокационного изображения, представленного на рис. 4, по аналогичным причинам наибольший интерес представляют парциальные кадры №№ 40...47, 58:61, 30 (рис. 6).

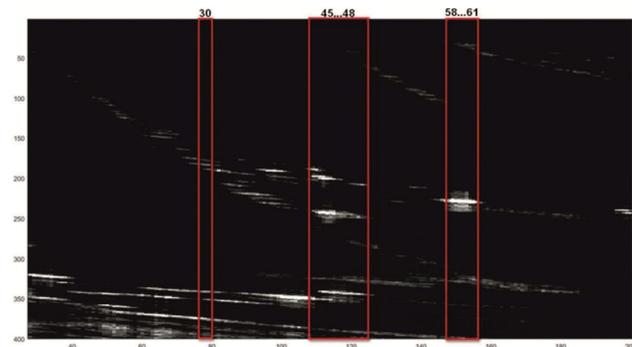


Рис. 5. Представляющие наибольший интерес для исследования парциальные кадры сигнала с одним уголковым отражателем

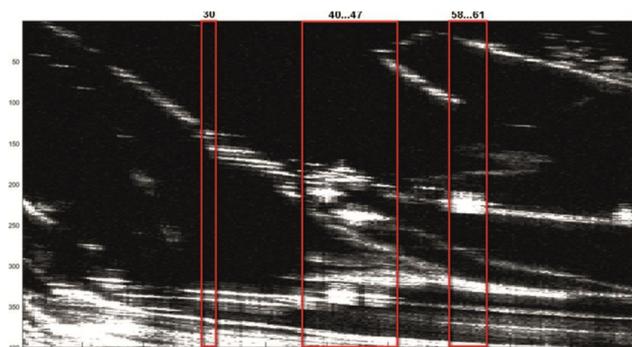


Рис. 6. Представляющие наибольший интерес парциальные кадры сигнала с двумя уголковыми отражателями  
Описанный выше выбор подходящих для исследова-

ния записей сигналов, а также представляющих наибольший интерес для исследования парциальных кадров и каналов дальности в рамках выбранных записей, позволил провести исследование и анализ возможностей и эффективности автофокусировки методом PGA, а также сформировать на основе рассмотренных радиолокационных изображений в режиме реального луча сфокусированные радиолокационные изображения.

### Анализ эффективности автофокусировки методом PGA

В ходе анализа рассматривались отдельные парциальные кадры записанных сигналов, содержащие отражения от представляющих наибольший интерес объектов: построек, холма, уголковых отражателей, растительности. На рис. 7 представлены графики функций фазовых ошибок для парциального кадра сигнала, содержащего отражения от объектов всех перечисленных выше типов. Аналогичные графики были получены также и для других парциальных кадров.

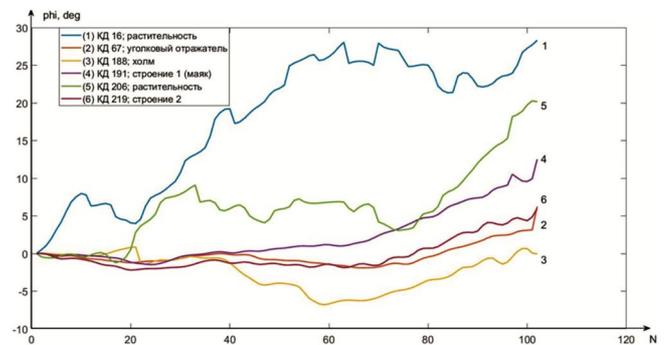


Рис. 7. Функции фазовых ошибок сигналов от объектов различных типов

Анализ рис. 7 показывает, что фазовые ошибки сигналов, отраженных от объектов живой природы, в данном случае представляющих собой растительность (деревья и кустарник), имеют функции фазовых ошибок, существенно отличающиеся от квази-идеальных, достигаемых при фокусировке по уголковым отражателям. Кроме того, для таких отражений функции фазовой ошибки имеют высокую нестабильность и большой разброс значений. Практические исследования показали, что настройка по таким сигналам невозможна (рис. 8).

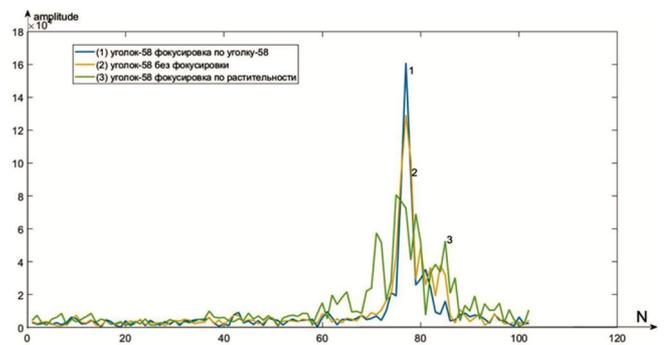
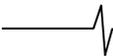


Рис. 8. Результаты фокусировки уголкового отражателя по каналу дальности, содержащему растительность

Таким образом, высокий уровень нестабильности функции фазовой ошибки и ее существенное отличие от



квази-идеальной, присущие сигналам, отраженным от объектов живой природы, делают настройку и автофокусировку радиолокационного изображения по таким объектам невозможной.

Аналогичный анализ был произведен для сигналов, отраженных от имеющихся в рамках рассматриваемого парциального кадра объектов неживой природы: маяка (постройка) и каменной насыпи. Проведенный анализ показал, что полученные функции фазовых ошибок являются высокостабильными по сравнению с фазовыми ошибками сигналов, отраженных от объектов живой природы. Проведенные практические исследования показали, что для фазовых ошибок такого рода автофокусировка является возможной. В частности, на рис. 9-11 приведены графики спектров сигнала, отраженного от уголка, расположенного в 58-м канале дальности рассматриваемого парциального кадра сигнала, для которого произведена фокусировка по различным каналам дальности этого же парциального кадра: 58-му (то есть по самому себе, эталонный случай, рис. 9), 156-му (насыпь, объект неживой природы, рис. 10) и 200-му (маяк, строение, рис. 11).

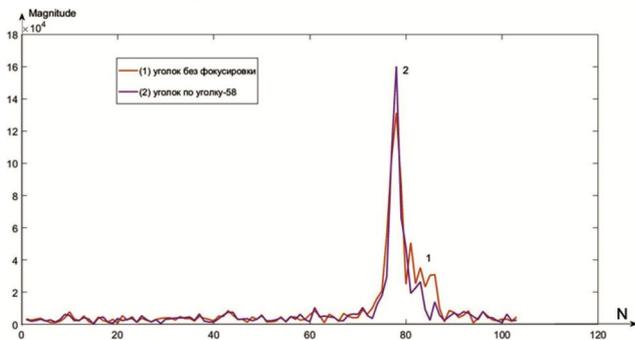


Рис. 9. Спектры сигнала, отраженного от уголкового отражателя, без фокусировки и с фокусировкой по самому себе

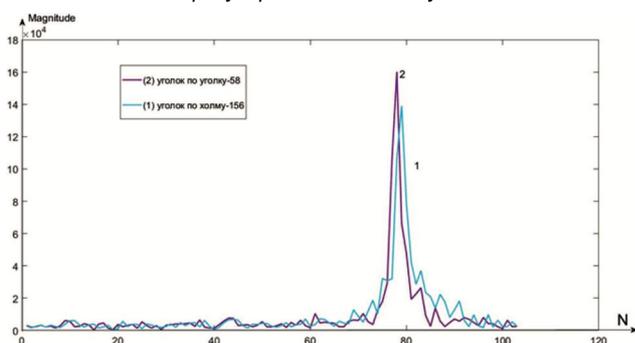


Рис. 10. Спектры сигнала, отраженного от уголкового отражателя, с фокусировкой по самому себе и по постройке

Таким образом, анализ приведенных на рис. 9 – 11 спектров показал, что проведение автофокусировки по фазовым ошибкам сигналов в каналах дальности, содержащих отражения от неживых объектов и построек, возможно, однако качество фокусировки для уголкового отражателя неизбежно снижается.

На рис. 12 – 14 представлены различные варианты фокусировки сигнала, отраженного от постройки (маяк, 200-й канал дальности того же парциального кадра сигнала, в рамках которого рассматривался уголкового отра-

жатель): автофокусировка по уголкового отражателя (58-й канал дальности, эталонный случай), по объекту неживой природы (холм, 156-й канал дальности), а также по соседним каналам дальности (например, по 198-му).

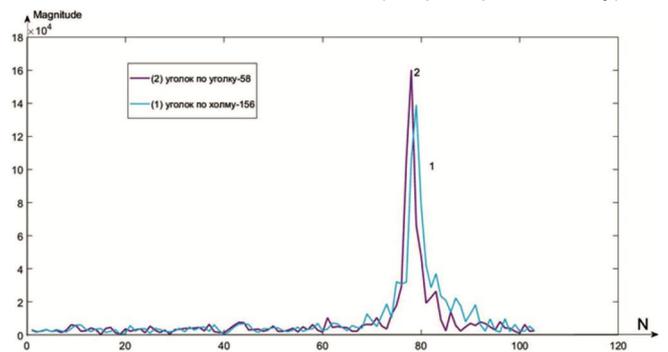


Рис. 11. Спектры сигнала, отраженного от уголкового отражателя, с фокусировкой по самому себе и по объекту неживой природы

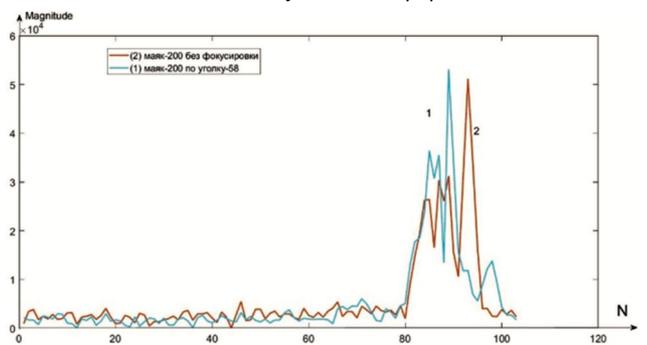


Рис. 12. Спектры сигнала, отраженного от строения, с фокусировкой по уголкового отражателя и без фокусировки

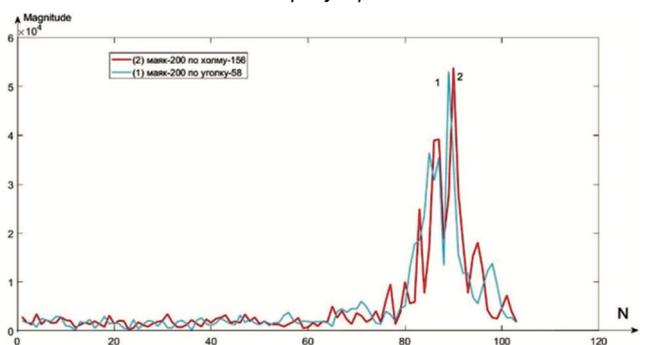


Рис. 13. Спектры сигнала, отраженного от строения, с фокусировкой по уголкового отражателя и по объекту неживой природы

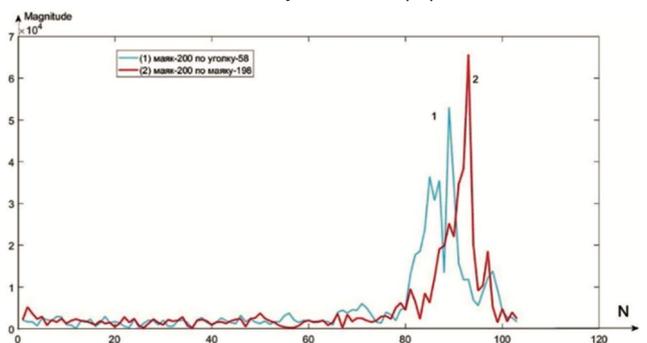


Рис. 14. Спектры сигнала, отраженного от строения, с фокусировкой по уголкового отражателя и по соседнему каналу дальности

По полученным результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Автофокусировка по объектам живой природы, в частности, по растительности, не представляется возможной ввиду высокой нестабильности функций фазовой ошибки сигналов, отраженных от объектов живой природы.

2. Фазовые ошибки сигналов, отраженных от объектов неживой природы, являются по сравнению с отражениями от объектов живой природы существенно более высокостабильными. Автофокусировка по таким фазовым ошибкам является возможной.

3. Автофокусировка по фазовым ошибкам сигналов, отраженных от строения, дает более качественный результат, чем автофокусировка по объекту неживой природы (холм): меньше ширина главного лепестка спектра, ниже уровень боковых лепестков. Следовательно, некоторые объекты неживой природы более пригодны для настройки, чем другие.

4. Возможно влияние на качество фокусировки посредством правильного подбора прямоугольного окна, которым обрабатывается отраженный сигнал перед вычислением фазовой ошибки.

5. Автофокусировка по соседним каналам дальности (200-й по 198-му) дает результирующий спектр, близкий по форме к дельта-функции, что неприемлемо для любых отражателей, кроме точечных, следовательно, автофокусировка любого канала дальности не должна вестись по соседним каналам. Желательно производить усреднение функции фазовой ошибки по большому числу подходящих для фокусировки каналов дальности в рамках одного парциального кадра.

#### Формирование РЛИ в режиме «ДОЛ» с автофокусировкой методом PGA

По результатам анализа возможностей и эффективности автофокусировки методом PGA были сформированы радиолокационные изображения для сигналов, описанных в разделе: «Формирование РЛИ в режиме реального луча».

В качестве первого этапа рассмотрено фокусирование и стыковка части парциальных кадров сигнала, содержащих представляющие наибольший интерес объекты. Результаты в виде сравнения радиолокационных изображений, полученных в режиме реального луча и в режиме ДОЛ с автофокусировкой, представлены на рис. 15 (сигнал с одним уголковым отражателем) и рис. 16 (сигнал с двумя уголковыми отражателями).

По результатам стыковки отдельно сфокусированных парциальных кадров был сделан вывод о возможности формирования радиолокационного изображения методом PGA даже при условии сильного «размытия» целей на несколько парциальных кадров. Следует отметить, что для подтверждения сделанного ранее вывода о возможности автофокусировки по фазовым ошибкам сигналов, отраженных от объектов неживой природы и построек, радиолокационные изображения были сформированы для двух случаев: автофокусировки центральных парциальных кадров сигналов при настройке по сигналам, отраженным от уголкового отражателя и

при настройке по сигналам, отраженным от расположенных на несколько большем удалении построек. Результирующие сформированные изображения представлены на рис. 17 и рис. 18 (сигнал с одним уголковым отражателем) и на рис. 19 и рис. 20 (сигнал с двумя уголковыми отражателями).

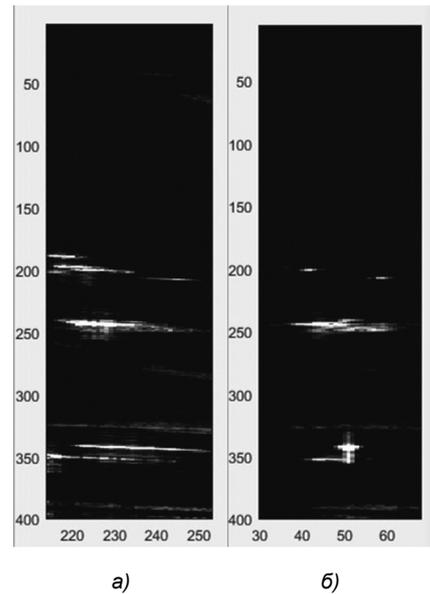


Рис. 15. Сравнение РЛИ в режиме реального луча (а) и в режиме ДОЛ-PGA (б) для парциальных кадров №№ 45...48 сигнала с одним уголковым отражателем

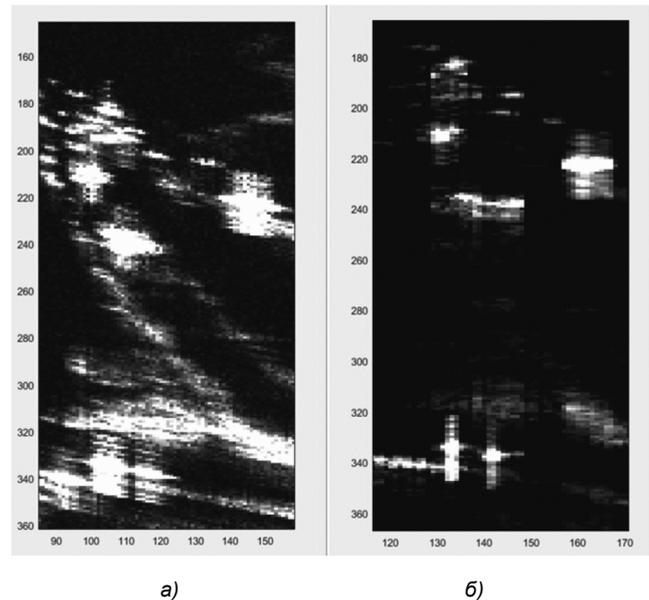
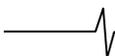
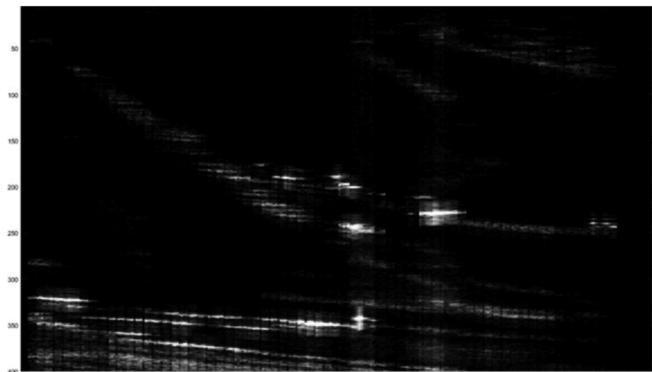


Рис. 16. Сравнение РЛИ в режиме реального луча (а) и в режиме ДОЛ-PGA (б) для парциальных кадров №№ 40...61 сигнала с двумя уголковыми отражателями

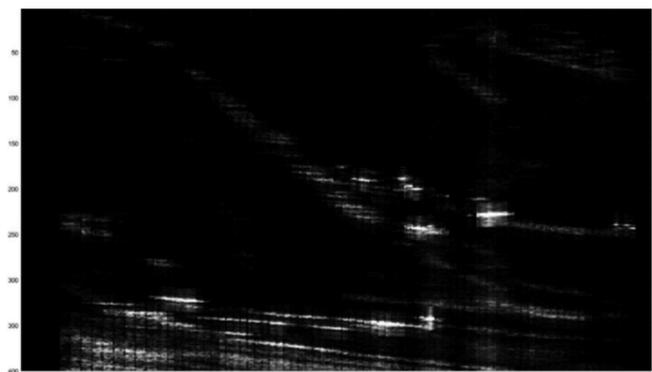
Полученные радиолокационные изображения значительно превосходят по качеству радиолокационные изображения для тех же сигналов, полученные ранее методом реального луча. При этом качество радиолокационных изображений, полученных при автофокусировке центральных парциальных кадров с настройкой по постройке, практически не уступает качеству аналогичных изображений, полученных для автофокусировки с настройкой по уголкового отражателям. Таким образом,



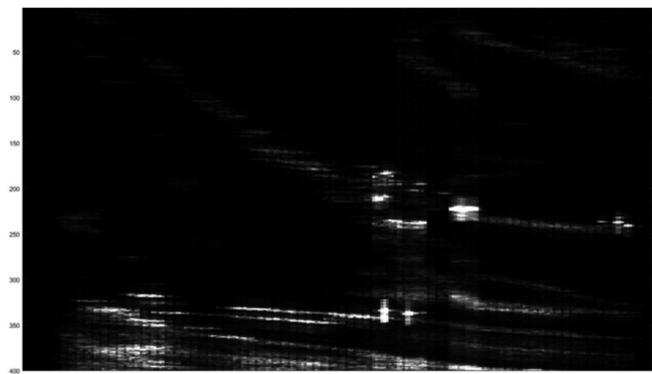
на основании полученных радиолокационных изображений, представленных на рис. 17 – 20, сделан вывод о возможности автофокусировки методом PGA в отсутствие уголковых отражателей, однако при этом необходимо наличие алгоритма стыковки парциальных кадров соответствующим образом, а также большого числа объектов неживой природы или искусственного происхождения.



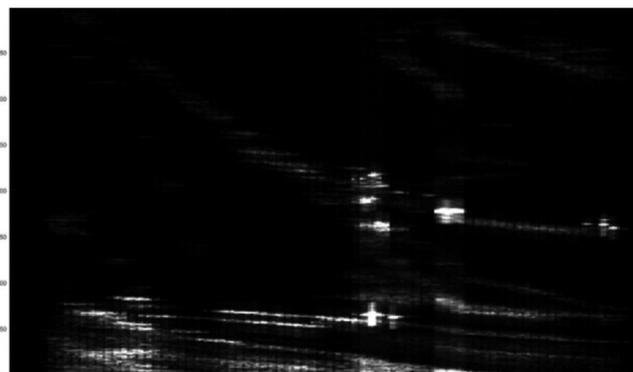
*Рис. 17. Радиолокационное изображение в режиме автофокусировки методом PGA (сигнал с одним уголковым отражателем, центральные парциальные кадры настраиваются по уголкового отражателю)*



*Рис. 18. Радиолокационное изображение в режиме автофокусировки методом PGA (сигнал с одним уголковым отражателем, центральные парциальные кадры настраиваются по постройке)*



*Рис. 19. Радиолокационное изображение в режиме автофокусировки методом PGA (сигнал с двумя уголковыми отражателями, центральные парциальные кадры настраиваются по уголковому отражателю)*



*Рис. 20. Радиолокационное изображение в режиме автофокусировки методом PGA (сигнал с двумя уголковыми отражателями, центральные парциальные кадры настраиваются по постройке)*

### **Заключение**

Основными результатами исследовательской части работы являются следующие выводы.

Настройка методом PGA при увеличении интервала синтезирования при наличии «хороших» для настройки объектов позволяет пропорционально повысить азимутальное разрешение РЛИ. К «хорошим» объектам отнесены точечные отражатели и цели искусственного происхождения близкие к точечным.

Настройка по уголкового отражателю и по объектам искусственного происхождения (маяку, другим постройкам) фактически не отличаются. То есть автофокусировка методом PGA может работать и без уголковых отражателей по естественным объектам.

В то же время настройка методом PGA по объектам живой природы не представляется возможной. Оценки фазовых ошибок, выполняемые по объектам живой природы, носят случайный характер и не сходятся даже при большом числе усреднений к истинной ошибке, за которую принималась оценка, получаемая по уголкового отражателю.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00419 А.*

### **Литература**

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н., Мансуров В.В., Охонский А.Г., Сазанов Н.А., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Шаповалов А.В. – Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988 – 304 с.
3. Cumming I.G., Wong F.H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. – Artech House: Norwood, MA. – 2005. – 625 p.
4. Carrara W.G., Goodman R.S., and Majewski R.M. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal Processing Algorithms, Artech House, Boston, London, 1995.

5. Ch. V. Jakowatz, D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, P.A. Thompson. Spotlight-mode synthetic aperture radar: a signal processing approach. Springer. 1996.

6. R.L. Morrison Jr., M.N. Do, and D.C. Munson, «SAR Image Autofocus By Sharpness Optimization: A Theoretical Study», IEEE Journal, 2003, pp. 1-13.

7. K.H. Liu, A. Wiesel, and D.C. Munson, «Synthetic Aperture Radar Autofocus via Semidefinite Relaxation», IEEE Transactions on Image Processing, vol. 22, is. 6, 2013, pp. 2317-2326.

8. K.H. Liu, A. Wiesel, and D.C. Munson, «Synthetic Aperture Radar Autofocus Based on a Bilinear Model», IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, is. 5, 2012, pp. 2735-2746.

9. J. Torgrimsson, P. Dammert, H. Hellsten, L. Ulander, «An Efficient Solution to the Factorized Geometrical Autofocus Problem», IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, num. 8, 2016, pp. 4732-4748.

10. P. Eichel, D. Ghiglia, and C. Jakowatz Jr., «Speckle processing method for synthetic-aperture-radar phase correction», Optics Letters, vol. 14, pp. 1-3, 1989.

11. D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, C.V. Jakowatz Jr., «Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction», Aerospace and Electronic

Systems, IEEE Transactions on, vol. 30, is. 3, pp. 827-835, 1994.

12. Витязев С.В., Андросов В.В., Витязев В.В., Шершнева Е.Д. Алгоритмы автофокусировки радиоизображений в условиях динамических траекторных нестабильностей // Цифровая обработка сигналов. № 1, 2012, С. 64-70

13. Витязев С.В., Андросов В.В., Витязев В.В. Моделирование и исследование эффективности алгоритма синтеза радиои изображений в режиме «доплеровского обужения луча» с автофокусировкой по градиенту фазы // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды 17-й междунар. науч.-техн. конф. – Том 1 – М., 2015. – С. 315-318.

14. Андросов В.В., Витязев С.В., Витязев В.В., Нишкин П.Б. Разработка программно-алгоритмического обеспечения обработки траекторного сигнала в режиме доплеровского обужения луча // Цифровая обработка сигналов и ее применение: тез. докл. 19-й МНТК. М.: РНТОРЭС им. Попова, 2017. С. 543-547.

15. V. Androsov, S. Vityazev, A. Kharin, V. Vityazev, «An Approach to Autofocus in Car-borne Radar Imaging Systems», 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS-2018), 2018. P. 847-850.

## НОВЫЕ КНИГИ

**Литвин С.М., Попов О.Б., Чернышева Т.В.**

**Аудиопроцессорная обработка сигналов звукового вещания – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2017 г. – 222 с.: ил.**

Звуковой сигнал, передаваемый по каналам звукового вещания, был и будет востребован в общем ряду с большим количеством альтернативных источников информации. Рассмотрены основные характеристики сигналов и каналов звукового вещания, базовые процедуры, используемые при обработке звукового вещательного сигнала (ЗВС); основные алгоритмы обработки сигнала в канале передачи. Проведен анализ и оценка искажений сигнала на всех этапах его передачи – от первичного цифрового преобразования до аудиопроцессорной обработки. Особое внимание уделено алгоритмам обработки и проблеме объективной оценки качества ЗВС в системах, не нормируемых в рамках современного метрологического обеспечения.

Для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 11.03.02 и 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.01 и 11.04.01 – «Радиотехника», 10.05.02 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем».

**Горшков Ю.Г.**

**Обработка речевых и акустических биомедицинских сигналов на основе вейвлетов. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2017 г. – 240 с.: ил.**

Изложены новые перспективные методы речевых и акустических биомедицинских сигналов на основе вейвлетов, аппаратно-программные средства для решения прикладных задач криминалистического исследования фонограмм, оценки эмоционального состояния человека, шумоочистки и засекречивания речи, а также построения биомедицинских систем диагностики заболеваний сердца и легких. Основное внимание уделено разработке вейвлет-технологий высокоточного анализа речевых и акустических биомедицинских сигналов. Впервые предложены решения многоуровневого вейвлет-преобразования, обеспечивающие визуализацию нестационарных сигналов с повышенным частотно-временным разрешением. Представлена система телемедицины нового поколения с засекречиванием акустических биомедицинских сигналов.

Для ученых и инженеров, работающих над созданием средств обработки биомедицинских сигналов на новых принципах. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам технических вузов.

