

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСНОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С АВТОФОКУСИРОВКОЙ В ШИРОКИХ СЕКТОРАХ УГЛОВ

С. И. Моряков, С. М. Нестеров, И. А. Скородумов

Центральный научно-исследовательский институт ВКС МО России, 141091, Москва

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2020 г.

**Аннотация.** Обоснованы рекомендации по инверсному синтезированию двумерных радиолокационных изображений объектов с автофокусировкой в широких (десятки градусов) секторах углов локации. Проведена оценка возможности синтезирования изображений объектов с автофокусировкой по результатам измерений отраженных ими сигналов в полунатурных (на открытом измерительном полигоне) условиях. Приведены экспериментальные результаты автофокусировки изображений объектов в секторах углов шириной  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .

**Ключевые слова:** инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения, эффективная площадь рассеяния, автофокусировка.

**Abstract.** Modern wideband radar systems makes possible to obtain high resolution inverse synthetic aperture radar images of objects. One of the difficult actual approaches in radar test facilities is wide angle autofocusing processing. This paper proposed a recommendations to wide angle (above 10 degrees) inverse synthetic image autofocusing processing based on dividing a large angle sector into several small sections. Also proposed an experimental results of autofocusing processing in  $30^\circ$  and  $60^\circ$  angle sector.

**Key words:** inverse synthetic aperture, radar images, radar cross section, autofocus processing.

Современная широкополосная радиолокационная техника позволяет в лабораторных (безэховые камеры), полунатурных (измерительные полигоны) и ряде натуральных условий получать наглядные двумерные радиолокационные изображения (РЛИ) объектов с высоким разрешением, используемые при решении прикладных задач [1-3]. Изображения формируются в плоскости инверсного синтезирования апертуры. Их разрешающая способность определяется шириной полосы частот зондирования и размером сектора углов локации.

Одной из ключевых задач формирования сфокусированных РЛИ объектов является компенсация фазовых набегов, возникающих вследствие относительного поступательного и неравномерности вращательного движений объекта за время синтезирования отраженного сигнала. Для решения данной задачи в безэховых камерах и на измерительных полигонах используют координатное сопровождение объекта с помощью дополнительного информационного канала. Компенсацию паразитных фазовых набегов по координатным данным можно выполнить и в натуральных условиях для объектов, движущихся по известным траекториям. Для других условий наблюдения задача приведения отражённого от объекта сигнала к единой дальности решается с использованием специальной математической обработки зарегистрированных радиолокационных данных. Такую обработку данных принято называть автофокусировкой.

В [4] проведена сравнительная оценка точности фазовой коррекции и скорости работы известных алгоритмов автофокусировки радиолокационных изображений объектов. Оценка проведена путём математического моделирования для узких (единицы градусов) секторов углов синтезирования. Хотя рассмотренные алгоритмы не ориентированы на компенсацию фазовых набегов вследствие поворота объекта, эти набегги представляются не столь значимыми при поворотах на углы даже в десятки градусов. В то же время, двумерные РЛИ объектов, формируемые в широких (десятки градусов) секторах углов локации, несут существенно больше информации для решения

прикладных задач. В этой связи оценка возможности формирования таких изображений с автофокусировкой представляет практический интерес.

Целью данной работы является оценка практических возможностей инверсного синтезирования двумерных РЛИ объектов с автофокусировкой известными алгоритмами в широких секторах углов локации.

Пусть наблюдаемый объект облучается широкополосным когерентным сигналом, а отраженный сигнал регистрируется в виде  $s(m, n)$ , где  $m$  - номер пачки импульсов из  $M$  принятых пачек за полное время наблюдения и  $n$  - номер частоты зондирования из  $N$  частот в пачке.

С помощью обратного преобразования Фурье для каждой принятой пачки сигнала получают  $M$  профилей дальности (одномерных РЛИ объекта) – синограмму объекта

$$h(m, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(m, n) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} kn\right), \quad (1)$$

где  $k = 1, \dots, N$  - номер бина профилей дальности.

Сворачивая (1) с учетом автофокусировки, получают двумерное РЛИ

$$g(l, k) = \sum_{m=0}^{M-1} h(m, k) \exp(j\varphi_m) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} lm\right), \quad (2)$$

где  $l$  - номер Доплеровской частоты,  $\varphi_m$  - фазовая поправка  $m$ -го профиля дальности.

Решение задачи автофокусировки сводится к нахождению фазовых поправок  $\varphi_m$  для каждого из полученных профилей дальности за время наблюдения объекта.

В известных алгоритмах фазовая поправка определяется итерационно, с использованием меры РЛИ. Для измерения степени размытия (зашумленности) РЛИ используют критерии максимума контраста (3) или минимума энтропии (4) [5].

$$C\left\{|g(l, k)|^2\right\} = \sqrt{\frac{MN}{S^2} \cdot \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l, k)|^4 - 1}, \quad (3)$$

где  $S = \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l, k)|^2$

$$E\left\{ |g(l, k)|^2 \right\} = - \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} |g(l, k)|^2 \cdot \ln |g(l, k)|^2. \quad (4)$$

Чем больше изображение размыто и зашумлено, тем больше его энтропия и меньше контраст.

Известно не менее шести алгоритмов автофокусировки изображений объектов, описанных в [4] с учётом адаптации к условиям инверсного синтезирования апертуры.

Задача настоящей работы состояла в обосновании путём математического моделирования рекомендаций по синтезированию изображений объектов с автофокусировкой известными алгоритмами в широких секторах углов локации и их экспериментальном подтверждении по результатам измерений отражённых от объектов сигналов в полунатурных условиях.

Рассмотрим модель объекта из 9-ти блестящих точек с одинаковой эффективной площадью рассеяния (ЭПР), размещенных в плоскости локации. Геометрия модели показана на рис.1 с помощью координатной сетки с шагом 1 м. Ось вращения объекта проходит через начало координат, ось  $Oz$  отложена по направлению зондирования в средний момент интервала синтезирования отражённого от объекта сигнала.

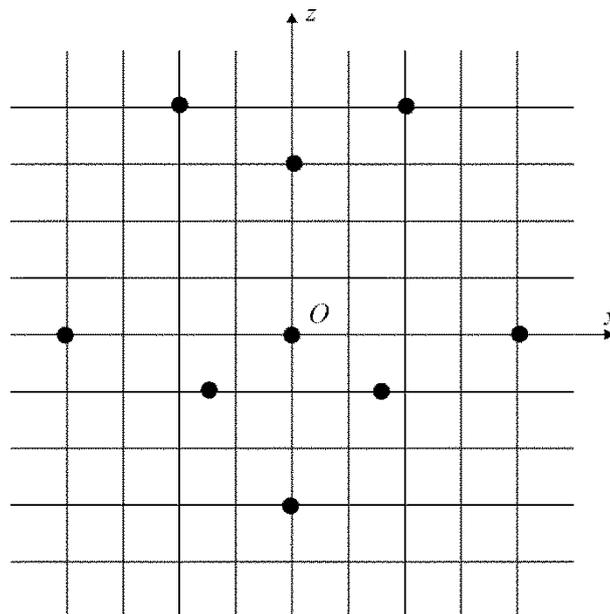


Рис.1. Геометрия модели объекта.

Принятый от объекта сигнал рассчитывался согласно

$$s(f, \psi) = \sqrt{\sigma} \sum_{j=1}^9 \exp\left(\frac{4\pi f}{c} [x_j \sin(\psi) + z_j \cos(\psi)]\right),$$

где  $f$  - частота;  $\psi$  - угол между направлением локации и осью  $Oz$ ;

$x_j, z_j$  - координаты блестящих точек в средний момент синтезирования.

Моделирование проводилось для следующих параметров: зондирующий сигнал – пачки импульсов на 128 частотных точках со ступенчатой перестройкой частоты с равным шагом в полосе от 9,1 до 10,1 ГГц; скорость вращения объекта –  $1^\circ/\text{с}$ ; период следования импульсов в пачке положен нулевым; период следования пачек 0,01 с, т.е. при равномерном вращении на каждый градус приходится 100 пачек. Отражённый сигнал рассчитан в секторе углов  $0 \pm 20^\circ$ .

Изменение дальности  $\Delta r$  до объекта задавалось для каждой пачки импульсов в секторе углов  $0 \pm 15^\circ$  согласно

$$\Delta r(i) = A \sin\left(m \frac{2\pi}{aM}\right) \cos\left(m \frac{0,7\pi}{aM}\right),$$

где  $m=0, \dots, M-1$  – номер пачки (в заданном секторе  $M=3000$ ),  $a=0,2$ ;  $A=0,4\text{м}$ .

График изменения дальности до объекта в зависимости от номера пачки в заданном секторе углов приведен на рис.2.

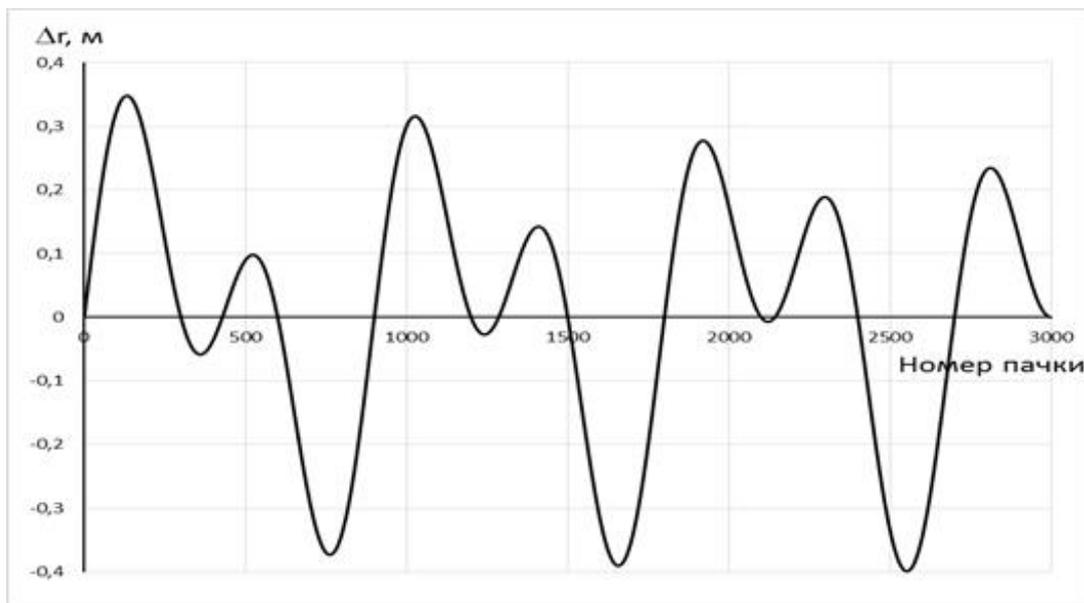


Рис.2. График изменения дальности до объекта.

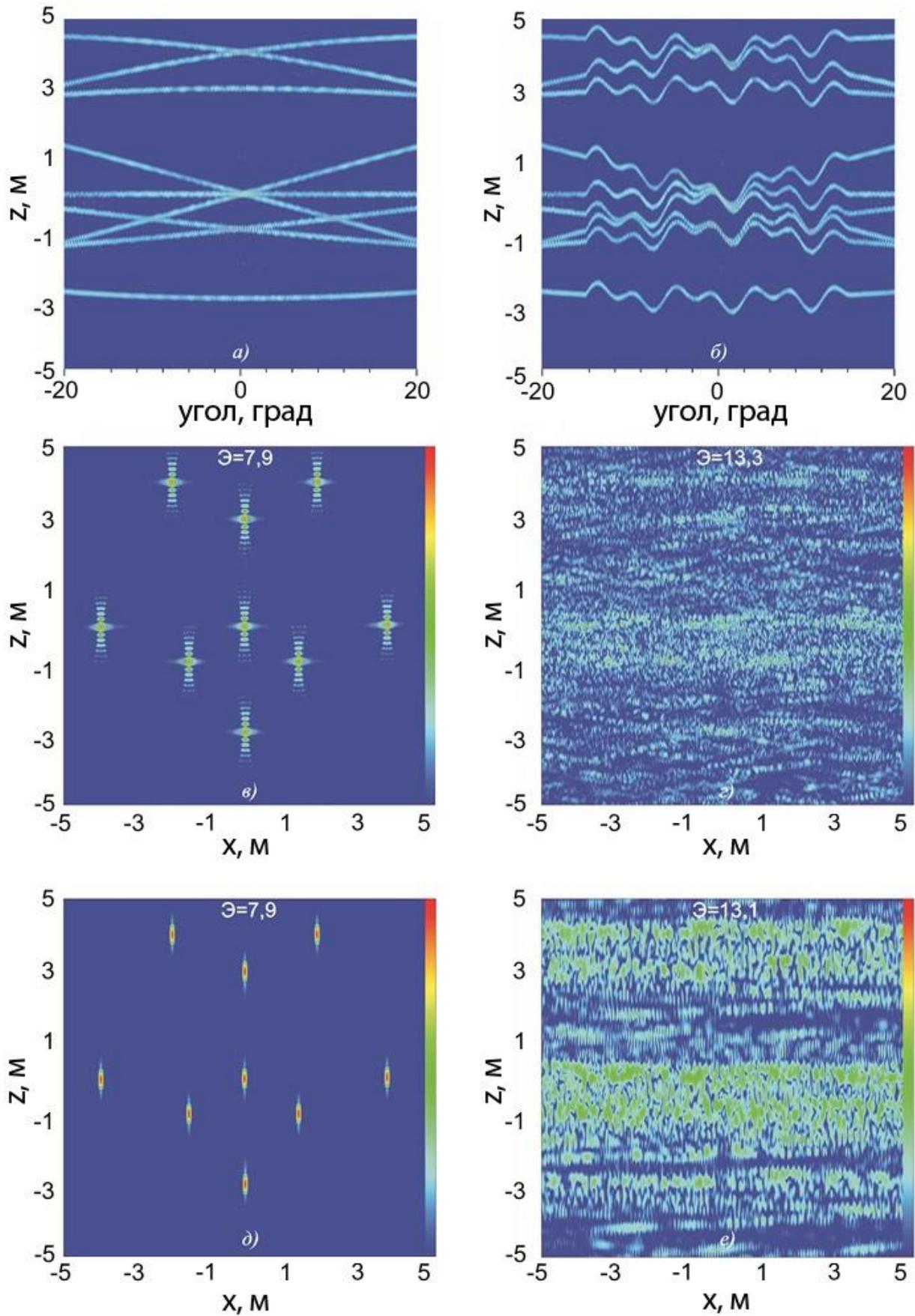


Рис.3. Синограммы (а,б) и РЛИ в секторе углов  $0^{\circ}\pm 15^{\circ}$  (в-е) объекта без (а, в, д) и с (б, г, е) изменением дальности; д и е – с весовой обработкой окном Кайзера с параметром 9

На рис. 3. приведены синопаммы ( $a, \bar{b}$ ) и РЛИ в секторе углов  $0^\circ \pm 15^\circ$  ( $b-e$ ) объекта без ( $a, \bar{b}$  и  $d$ ) и с ( $\bar{b}, \bar{z}$  и  $e$ ) изменением дальности. Изображения  $d$  и  $e$  получены с весовой обработкой окном Кайзера с параметром 9, значения энтропии синтезированных РЛИ обозначены буквой «Э».

Интенсивность откликов по мощности отражена на РЛИ палитрой от синего цвета (минимум) до красного (максимум). Цвета палитры сопоставлены со шкалой ЭПР в дБ.

Анализ полученных РЛИ объекта показывает, что изображения, синтезированные с изменениями дальности, существенно зашумлены (расфокусированы) и имеют большую энтропию в сравнении с эталонными.

Выполненная автофокусировка [2] РЛИ объекта при нулевом ракурсе в секторах углов различного размера позволила определить максимально допустимую ширину сектора, в котором изображение достаточно хорошо фокусировалось, равную  $\pm 3^\circ$ .

Далее использовался приём разделения широкого сектора углов  $0^\circ \pm 15^\circ$  на пять подсекторов размером  $\pm 3^\circ$ , в которых выполнялась автофокусировка:

$$\begin{aligned} 1) 0^\circ \pm 3^\circ; & \quad 2) 6^\circ \pm 3^\circ; & \quad 3) -6^\circ \pm 3^\circ; & \quad (5) \\ 4) 12^\circ \pm 3^\circ; & \quad 5) -12^\circ \pm 3^\circ. \end{aligned}$$

Автофокусировка в подсекторах выполнялась по алгоритму определения фазового градиента с оценкой изменения фазовой поправки с помощью несмещённого минимального различия [4]

$$\varphi_m = \varphi_{m-1} + \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \text{Im} \{ [h(m, k) - h(m-1, k)] \cdot h^*(m, k) \}}{\sum_{k=0}^{N-1} |h(m, k)|^2}, \quad \varphi_0 = 0. \quad (6)$$

Энтропия изображений (4) минимизировалась до достижения асимптоты. После достижения асимптоты прочие алгоритмы автофокусировки [4] результат не улучшали.

Результаты синтеза РЛИ объекта в подсекторе  $0^\circ \pm 3^\circ$  и значения энтропии изображений приведены на рис.4:  $a$  и  $\bar{b}$  – эталонные изображения без

и с весовой обработкой окном Кайзера, *в* и *г* – до фокусировки, *д* и *е* – после.

В таблице 1 приведены значения энтропии РЛИ для каждого подсектора (5) до и после автофокусировки. В скобках указаны результаты с весовой обработкой окном Кайзера.

Таблица 1. Значения энтропии РЛИ для каждого подсектора

Подсектор	$0^\circ \pm 3^\circ$	$6^\circ \pm 3^\circ$	$-6^\circ \pm 3^\circ$	$12^\circ \pm 3^\circ$	$-12^\circ \pm 3^\circ$
До автофокусировки	12,8 (12,3)	12,9 (12,4)	12,7 (12,8)	13,1 (12,8)	12,5 (12,6)
После автофокусировки	11,5 (11,0)	11,1 (10,2)	11,8 (11,4)	11,7 (11,3)	11,2 (10,5)
Эталон	9,2 (9,7)	9,2 (9,7)	9,2 (9,7)	9,2 (9,7)	9,2 (9,7)

На рис.5 приведены результаты синтезирования РЛИ объекта в широком секторе углов  $0^\circ \pm 15^\circ$ : *а* и *б* – с предварительной фокусировкой в секторе  $0^\circ \pm 3^\circ$  без и с весовой обработкой окном Кайзера, *в* и *г* – с предварительной фокусировкой в секторах:  $0^\circ \pm 3^\circ$ ;  $6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-6^\circ \pm 3^\circ$  без и с весовой обработкой окном Кайзера, *д* и *е* – с предварительной фокусировкой в секторах:  $0^\circ \pm 3^\circ$ ;  $6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $12^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-12^\circ \pm 3^\circ$ , без и с весовой обработкой окном Кайзера.

Сравнительный анализ результатов математического моделирования показал следующее.

При смоделированных изменениях дальности автофокусировка сигнала позволяет получать РЛИ объектов с достаточным для практики качеством фокусировки в подсекторах углов  $\pm 3^\circ$ .

Весовая обработка сигнала позволяет уменьшить энтропию сфокусированных изображений и погрешность восстановления максимумов откликов.

Приём объединения сфокусированных сигналов в центральном и двух соседних с ним секторах углов позволяет получать сфокусированные РЛИ объектов в секторе углов, ширина которого в 3 раза больше ширины составляющих его секторов. Попытка дополнительно расширить этот сектор углов за счёт добавления следующих соседей не улучшает качество сфокусированного изображения.

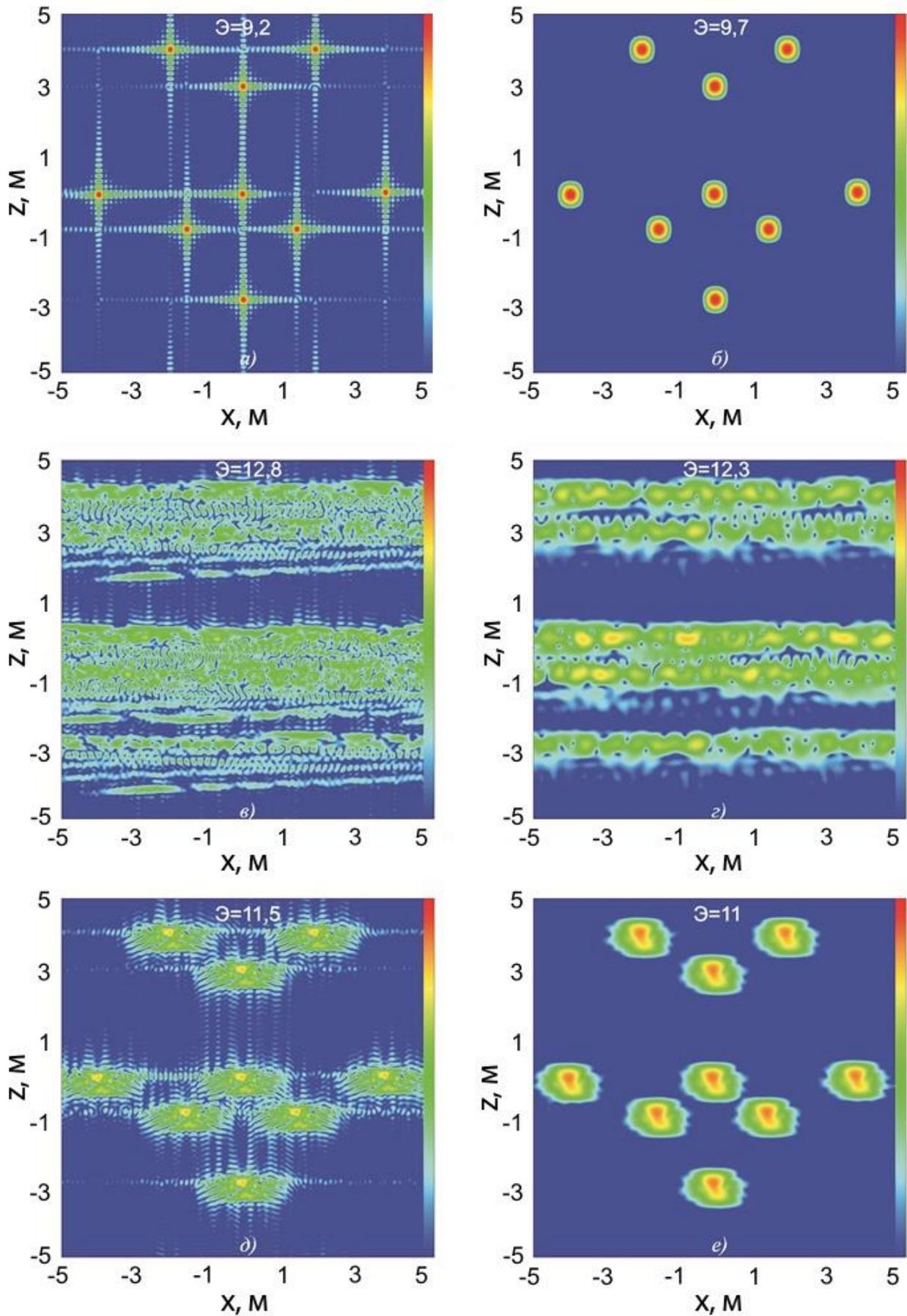


Рис.4. РЛИ объекта в секторе углов  $0^\circ \pm 3^\circ$  (а и б – эталонные изображения без и с окном Кайзера, в и г – до фокусировки, д и е – после)

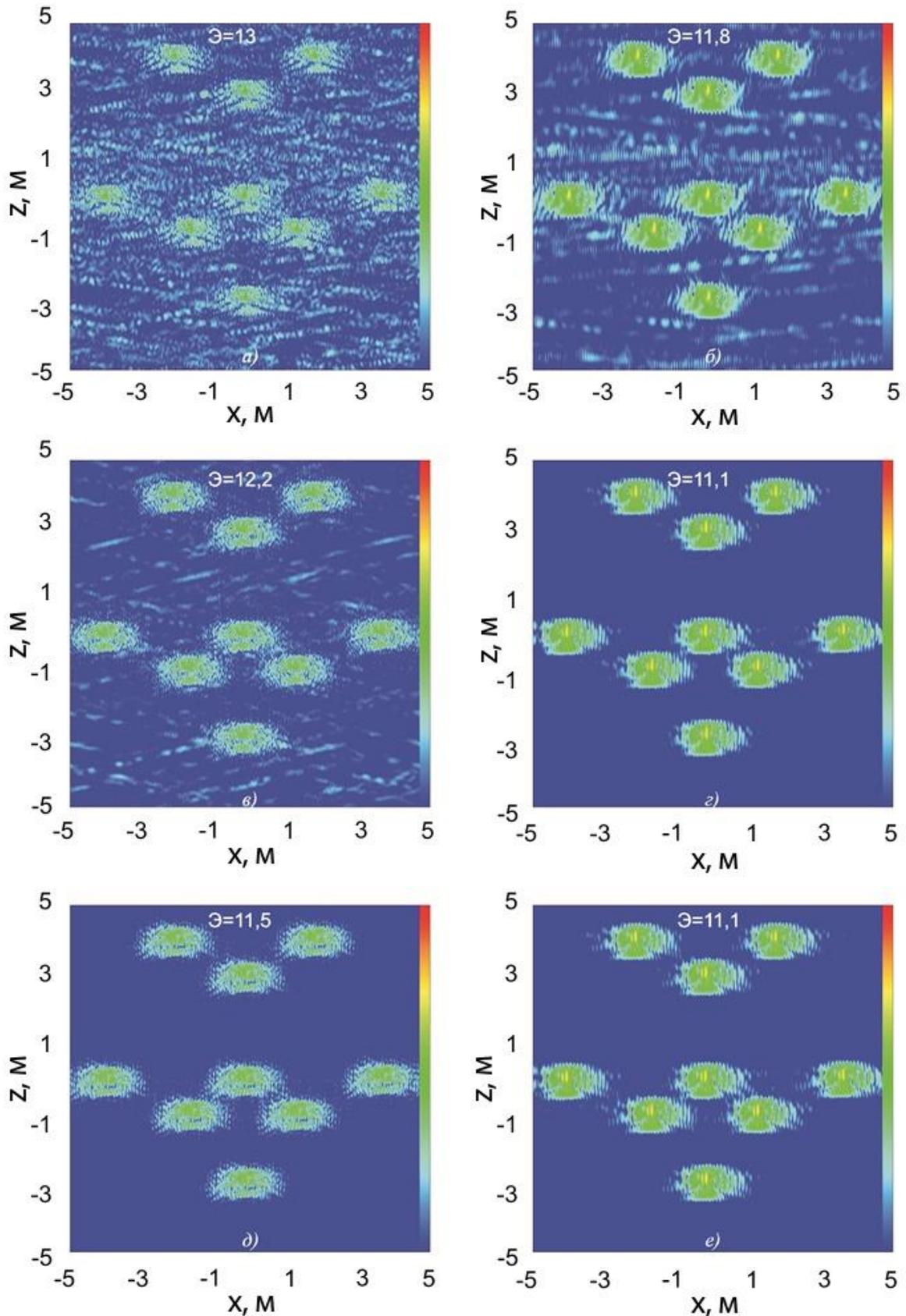


Рис.5. РЛИ объекта в секторе углов  $0^\circ \pm 15^\circ$  (а и б – с предварительной фокусировкой в секторе  $0^\circ \pm 3^\circ$  без и с окном Кайзера, в и г – с предварительной фокусировкой в секторах:  $0^\circ \pm 3^\circ$ ;  $6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-6^\circ \pm 3^\circ$  без и с окном Кайзера, д и е – с предварительной фокусировкой в секторах:  $0^\circ \pm 3^\circ$ ;  $6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-6^\circ \pm 3^\circ$ ;  $12^\circ \pm 3^\circ$ ;  $-12^\circ \pm 3^\circ$ , без и с окном Кайзера)

В целом, по результатам математического моделирования можно предложить следующие рекомендации по синтезированию двумерных РЛИ объектов с автофокусировкой в широких секторах углов:

1) оценить возможность фокусировки по синограмме объекта, на которой должны быть прописаны характерные круговые следы от локальных источников отражения с незначительными колебаниями по дальности;

2) определить максимальную ширину сектора углов относительно ракурса синтезируемого РЛИ, где автофокусировка даёт положительный результат;

3) выполнить автофокусировку сигнала в центральном и соседних секторах углов, ширина которых не больше определённой;

4) синтезировать РЛИ объекта в секторе углов, объединённом из трёх, с использованием «пространственных частот» [1] и весовой обработкой сигнала.

Необходимо отметить чувствительность автофокусировки к точности угловой привязки сигналов и к набегам фаз при значительных (десятки и более градусов) изменениях углов локации, что ограничивает практические возможности синтезирования РЛИ с автофокусировкой в широких секторах углов.

Для проверки этих возможностей были использованы результаты измерений отражённых сигналов от трёх объектов различной конфигурации в полунатурных условиях.

Условия измерений: открытый полигон с рабочей зоной измерений на высоте 30м; гибкая система подвеса объектов с максимальным габаритным размером до 8м; объекты соединены оттяжками с механизмом вращения на земле; задаваемая скорость вращения 3...6°/с; дальность до измерительной установки около 1 км.

Средство измерений: когерентная широкополосная измерительная установка с 1024 частотами зондирования импульсным периодическим

сигналом со ступенчатой перестройкой частоты в диапазоне от 12,75 ГГц до 17,25 ГГц; длительность импульса 0,2 мкс, период следования 10 мкс.

Объекты измерений: полномасштабные макеты двух типовых ракет цилиндрически-конусообразной формы длиной около 6м (объекты №1 и №2) и беспилотного летательного аппарата длиной 3,5м с размахом крыла 4м (объект №3).

Радиолокационный измерительный канал синхронизирован с расположенными на механизме вращения датчиком градусных меток и высокоскоростной цифровой видеокамерой, фиксирующей видеоряд положений объекта в процессе вращения.

Для координатной привязки объекта измерений по видеокадрам используются устанавливаемые на нём специальные маркеры. Координатная привязка по оптическим данным позволяет компенсировать в измеренных радиолокационных данных изменение дальности до объекта, обусловленное ветровыми и инерционными нагрузками системы подвеса в процессе вращения на высоте, а также угловую неравномерность этого вращения [2].

Используя координатную привязку по оптическим данным, получают сфокусированные РЛИ объектов с компенсацией изменения дальности и угловой неравномерности за время синтезирования сигнала. Такие изображения использовались в качестве эталонных для проверки качества автофокусировки РЛИ объектов, синтезированных без коррекции зарегистрированных радиолокационных данных.

Перед автофокусировкой радиолокационные данные привязывались к углам по градусным меткам, с равным шагом между градусами. Для минимизации влияния на качество изображений неравномерности вращения, измерения проводились в безветренную погоду или при слабом ветре. Автофокусировка (2) выполнялась по фазовому градиенту (6) с минимизацией энтропии изображений (4) до достижения асимптоты.

Результаты автофокусировки РЛИ объекта №1.

Измерения отражённого от объекта №1 сигнала выполнены при практически равномерном вращении объекта вокруг оси, проходящей вблизи его центра масс.

На рис.6 сопоставлены синопаммы объекта №1 в носовом секторе углов  $0\pm 90^\circ$ , полученные без компенсации изменения дальности и с компенсацией по оптическим данным (эталонные изображения). На рис.7 приведены РЛИ объекта №1 в секторах углов локации  $0\pm 15^\circ$  и  $0\pm 30^\circ$ : без компенсации и автофокусировки – а) и з), с автофокусировкой – б) и д), с компенсацией – в) и е). Интенсивность откликов по мощности отражена на рисунках палитрой от синего цвета (минимум) до красного (максимум). На рис.7е) белым цветом очерчен контур исследуемого объекта.

С учётом результатов математического моделирования широкий угловой сектор синтезирования РЛИ составлялся из трёх подсекторов меньшего размера, в которых выполнялась автофокусировка. При этом размер центрального подсектора составил  $\pm 15^\circ$ . Размеры соседних с ним подсекторов были ограничены 15-ю градусами, так что размер общего углового сектора фокусировки сигнала составил  $\pm 30^\circ$ .

В таблице 2 приведены значения энтропии и максимумов откликов РЛИ объекта №1 без компенсации изменения дальности, с автофокусировкой и с компенсацией по оптическим данным (целевые значения автофокусировки).

Таблица 2 – Энтропия / Максимум откликов (дБ) РЛИ объекта №1

Сектор углов	Без компенсации	После автофокусировки	С компенсацией
$0\pm 15^\circ$	13,2 / 19	12,4 / 21	8,9 / 21
$-30^\circ \dots -15^\circ$	10,42 / 25	10,2 / 25	9 / 26
$+15^\circ \dots +30^\circ$	12 / 23	11,86 / 23	9,1 / 25
$0\pm 30^\circ$	13,6 / 16	12,2 / 23 <sup>*)</sup>	10 / 23 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> с учетом окна Кайзера с параметром 9

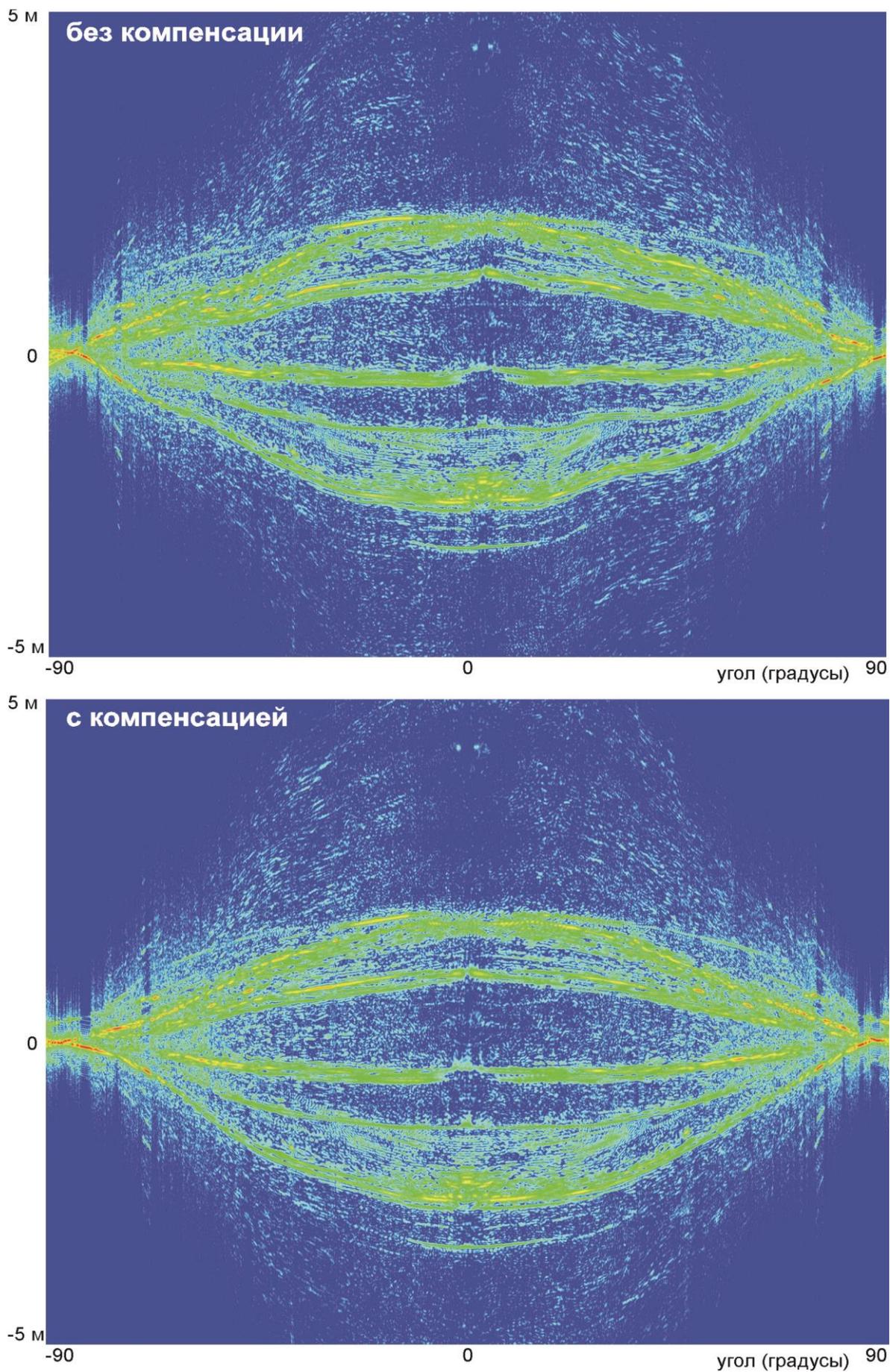


Рис.6. Синограммы объекта №1 в секторе углов  $0\pm 90^\circ$  – без и с компенсацией изменения дальности

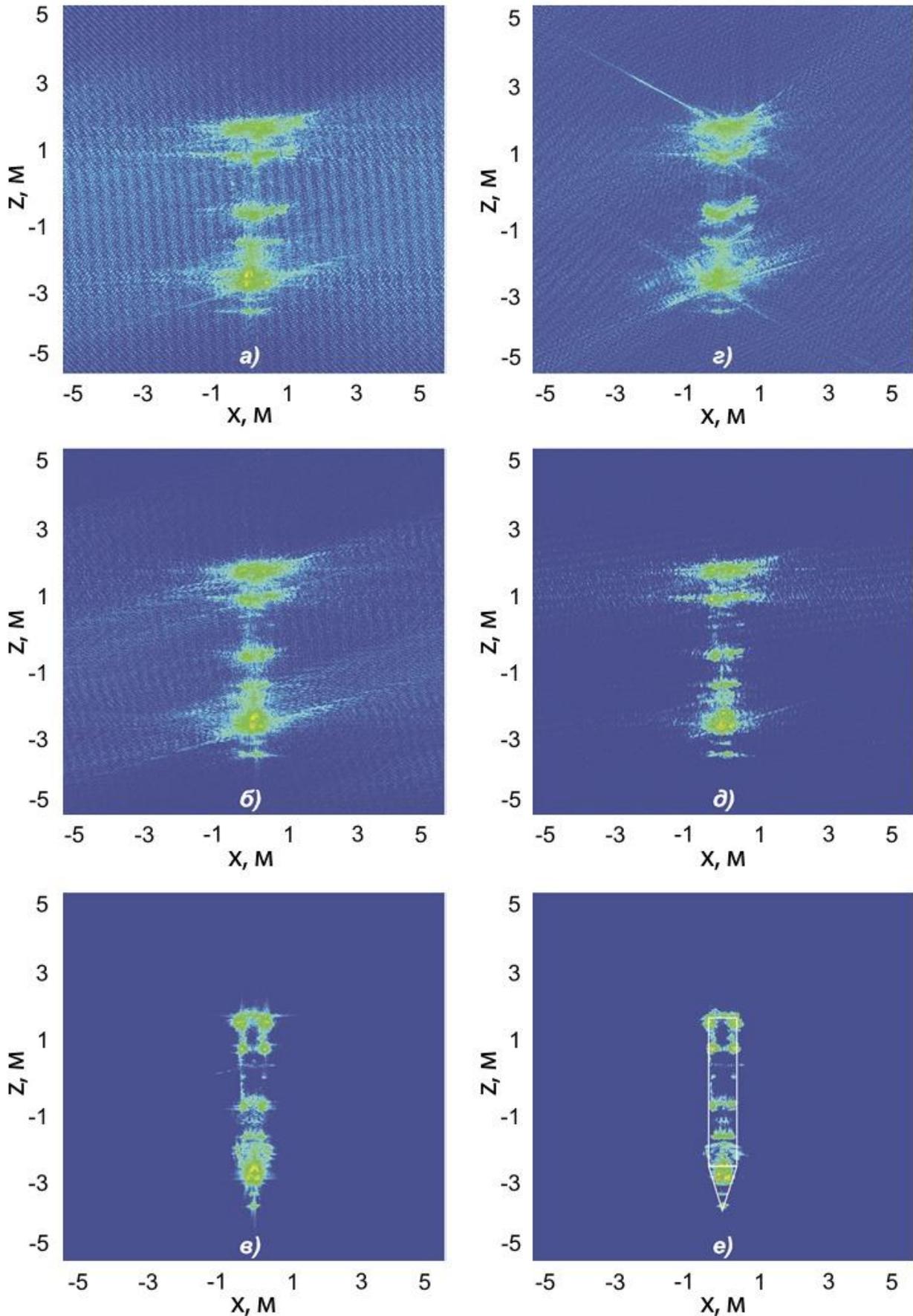


Рис.7. РЛИ объекта №1 (в секторе углов  $0\pm 15^\circ$ : *а* – без компенсации, *б* – с автофокусировкой, *в* – с компенсацией; в секторе углов  $0\pm 30^\circ$ : *г* – без компенсации, *д* – с автофокусировкой, *е* – с компенсацией)

Сравнительный анализ полученных результатов показывает незначительное отличие синограмм без и с компенсацией, а также отсутствие существенного улучшения изображений (как визуального, так и по энтропии и максимумам откликов) в подсекторах размером  $15^\circ$  и  $\pm 15^\circ$ , где выполнялась автофокусировка, что можно объяснить хорошим вращением объекта и потребными незначительными поправками дальности. В то же время, в широком секторе углов  $0\pm 30^\circ$ , после выполнения автофокусировки в составляющих его подсекторах и использования весовой обработки сигнала окном Кайзера, синтезировано визуально и по количественным оценкам улучшенное РЛИ объекта. Тем самым размер сектора углов синтезирования изображений с достаточным для практики качеством увеличен в 2 раза.

Результаты автофокусировки РЛИ объекта №2.

Значительное расстояние между центром масс и геометрическим центром объекта №2 в процессе измерений приводило к смещениям по дальности его оси вращения. Эти смещения иллюстрируют синограммы объекта без и с компенсацией изменения дальности, которые сопоставлены на рис.8.

На рис.9 приведены синтезированные РЛИ объекта №2 в секторах углов локации  $0\pm 15^\circ$  и  $0\pm 30^\circ$ : без компенсации и автофокусировки – *a)* и *з)*, с автофокусировкой – *б)* и *д)*, с компенсацией – *в)* и *е)*. Интенсивность откликов по мощности отражена на рисунках палитрой от синего цвета (минимум) до красного (максимум). На рис.9*е)* белым цветом очерчен контур объекта.

Решалась та же задача определения максимально большого размера сектора углов синтезирования изображения с достаточным для практики качеством. Этот сектор составлялся из трёх подсекторов меньшего размера, в которых выполнялась автофокусировка: центральном и двух соседних. Размеры центрального подсектора и общего углового сектора автофокусировки сигнала были определены в те же  $\pm 15^\circ$  и  $\pm 30^\circ$ .

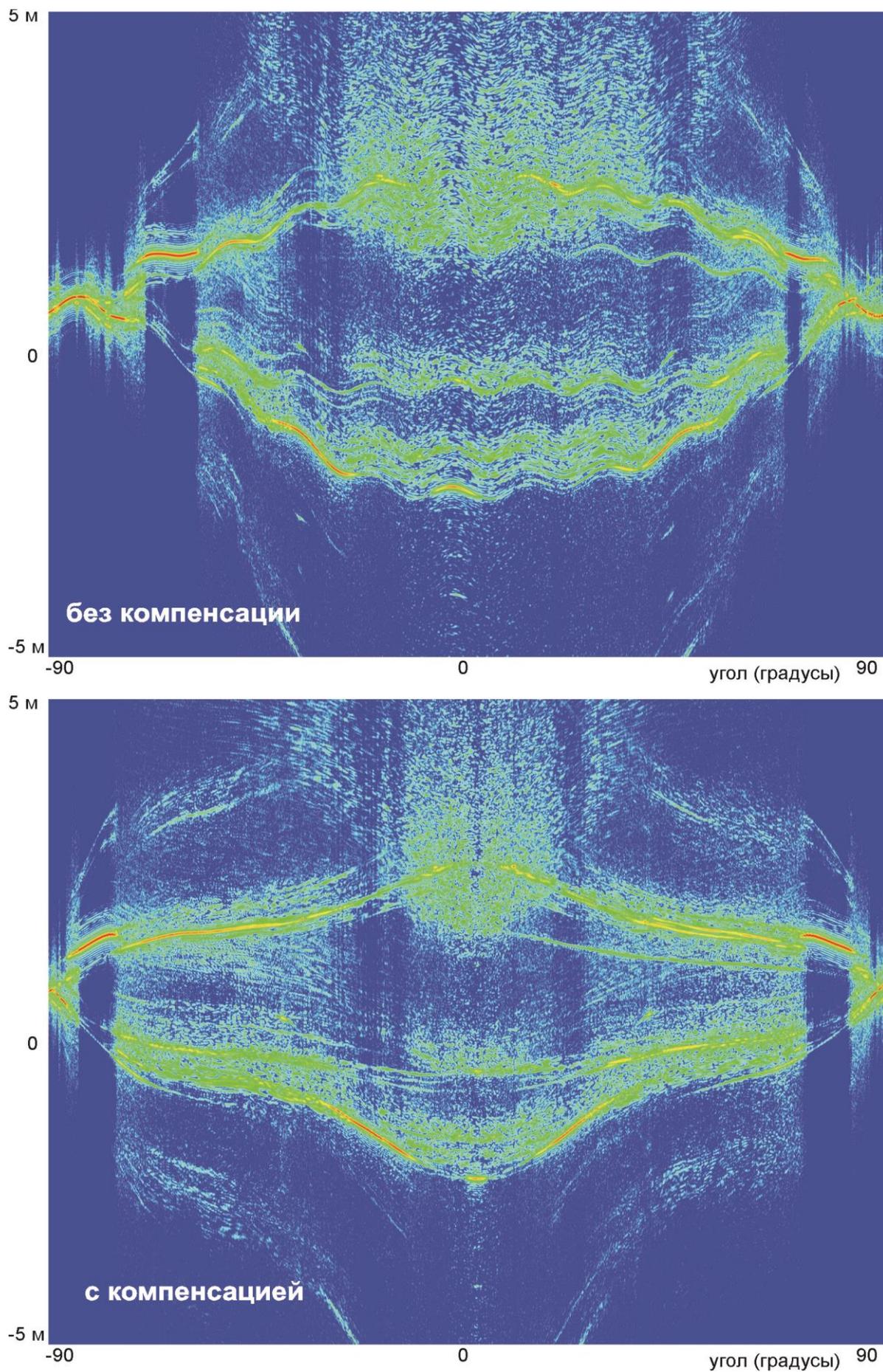


Рис.8. Синограммы объекта №2 в секторе углов  $0\pm 90^\circ$  – без и с компенсацией изменения дальности

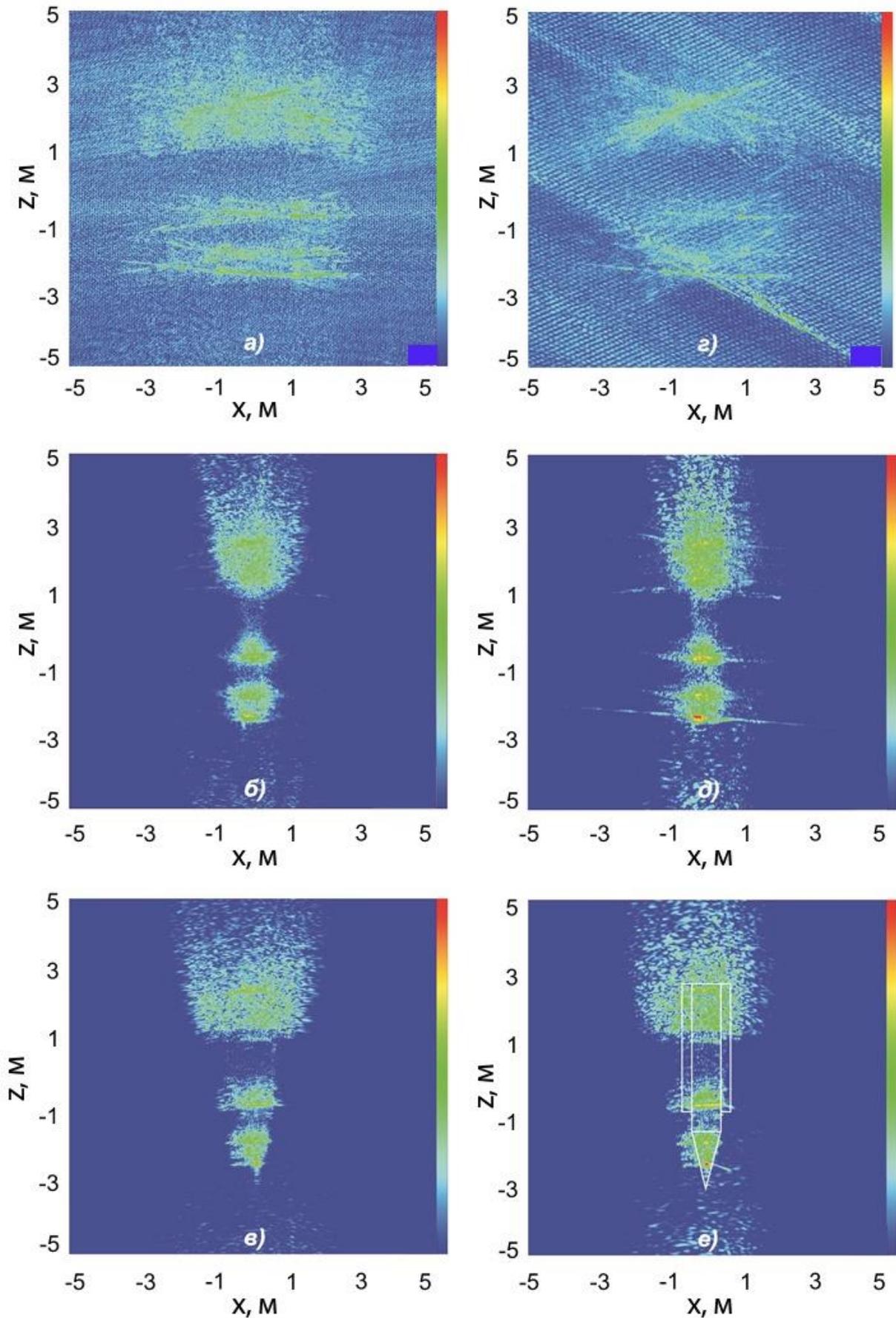


Рис.9. РЛИ объекта №2 (в секторе углов  $0\pm 15^\circ$ : *a* – без компенсации, *б* – с автофокусировкой, *в* – с компенсацией; в секторе углов  $0\pm 30^\circ$ : *z* – без компенсации, *д* – с автофокусировкой, *е* – с компенсацией)

В таблице 3 приведены значения энтропии и максимумов откликов РЛИ объекта №2 без компенсации изменения дальности, с автофокусировкой и с компенсацией по оптическим данным (целевые значения автофокусировки).

Таблица 3 – Энтропия / Максимум откликов(дБ) РЛИ объекта №2

Сектор углов	Без компенсации	После автофокусировки	С компенсацией
$0 \pm 15^\circ$	14,46 / 22	11,1 / 25	10,7 / 30
$-30^\circ \dots -15^\circ$	14,19 / 25	12,08 / 28	9,46 / 38
$+15^\circ \dots +30^\circ$	13,65 / 25	11 / 26	9,95 / 34
$0 \pm 30^\circ$	14,64 / 16	12,1 / 25 <sup>*)</sup>	11,7 / 32 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> с учетом окна Кайзера с параметром 9

Сравнительный анализ полученных результатов показывает существенное улучшение изображений объекта (как визуально, так и по энтропии и максимумам откликов) после выполненной автофокусировки. А приём объединения сфокусированных данных позволил увеличить размер сектора углов синтезирования РЛИ с достаточным для практики качеством с  $\pm 15^\circ$  до  $\pm 30^\circ$ .

Результаты автофокусировки РЛИ объекта №3.

Объект №3 также имел смещения оси вращения по дальности, отраженные на синограмме без компенсации, сопоставленной на рис.10 со скомпенсированной (эталонной) синограммой.

На рис.11 приведены РЛИ объекта №3 в секторах углов локации с борта  $90 \pm 15^\circ$  и  $90 \pm 30^\circ$ : без компенсации и автофокусировки – а) и г), с автофокусировкой – б) и д), с компенсацией – в) и е). На рис.11е) белым цветом очерчен контур объекта.

Размеры центрального подсектора и общего углового сектора автофокусировки сигнала определены в те же  $\pm 15^\circ$  и  $\pm 30^\circ$ .

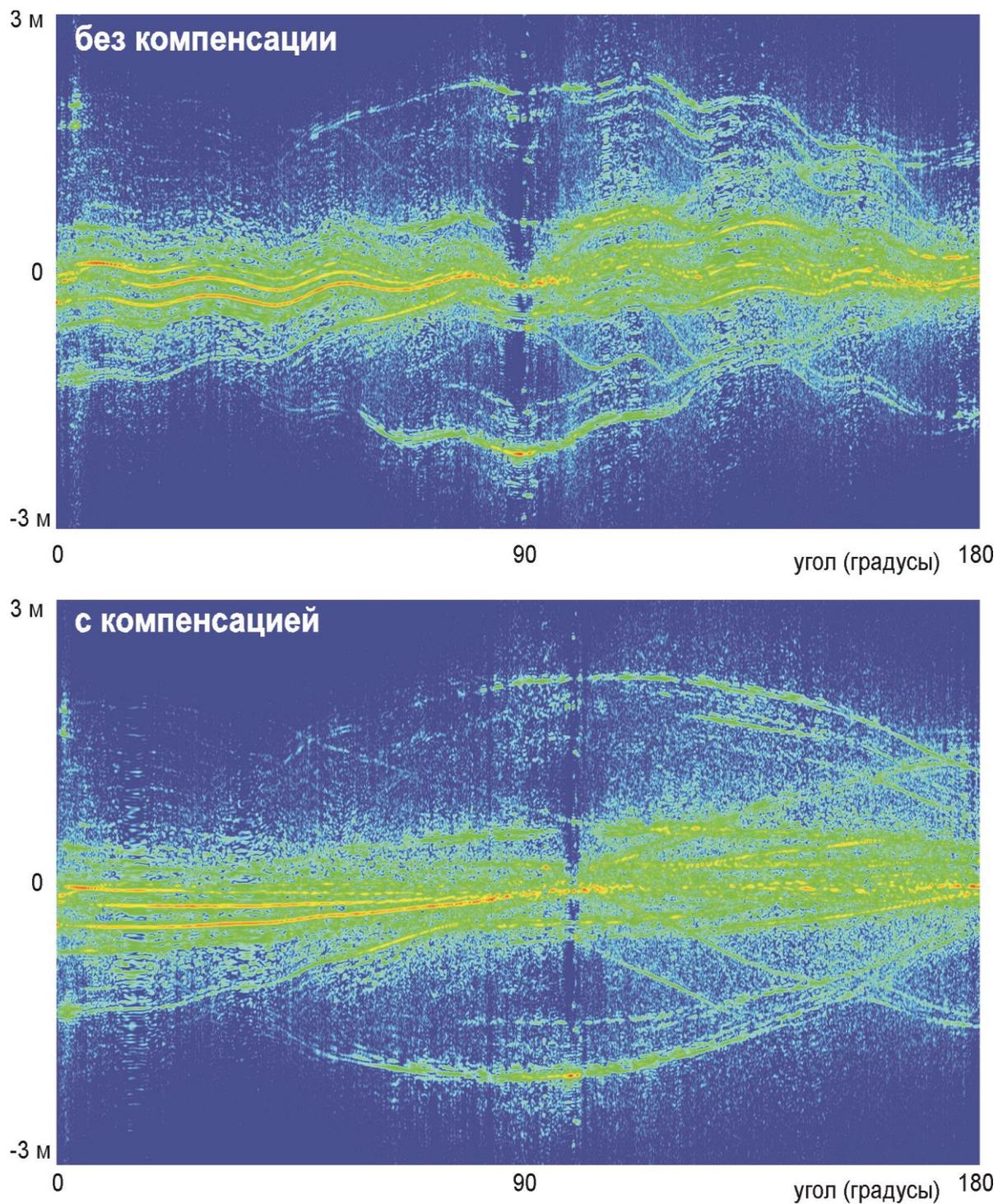


Рис.10. Синограммы объекта №3 в секторе углов  $90\pm 90^\circ$  – без и с компенсацией изменения дальности

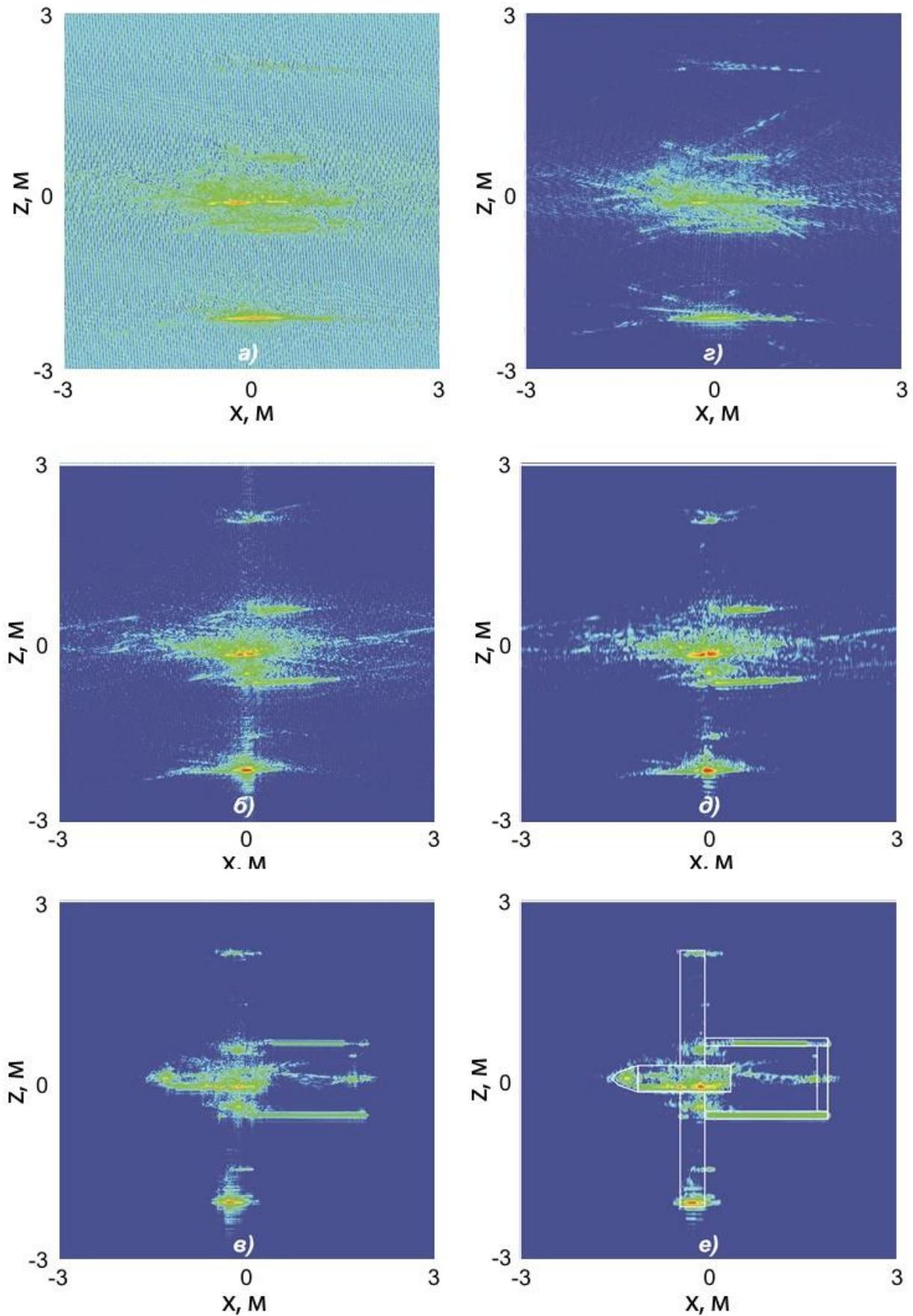


Рис.11. РЛИ объекта №3 (в секторе углов  $90\pm 15^\circ$ : *а* – без компенсации, *б* – с автофокусировкой, *в* – с компенсацией; в секторе углов  $90\pm 30^\circ$ : *з* – без компенсации, *д* – с автофокусировкой, *е* – с компенсацией)

В таблице 4 приведены значения энтропии и максимумов откликов РЛИ объекта №3 без компенсации изменения дальности, с автофокусировкой и с компенсацией по оптическим данным (целевые значения автофокусировки).

Таблица 4 – Энтропия / Максимум откликов(дБ) РЛИ объекта №3

Сектор углов	Без компенсации	После автофокусировки	С компенсацией
90±15°	12,67 / 37	10 / 42	9,5 / 39
60°...75°	10,68 / 37	10 / 43	9,45 / 41
105°...120°	12,13 / 28	11,56 / 31	9,45 / 38
90±30°	11,64 / 32	10,5 / 36 <sup>*)</sup>	9,4 / 38 <sup>*)</sup>

<sup>\*)</sup> с учетом окна Кайзера с параметром 9

Сравнительный анализ полученных результатов показывает существенное улучшение изображения объекта в центральном подсекторе углов ±15°. Кроме того, автофокусировка сигнала в подсекторах и приём объединения данных из трёх подсекторов позволили увеличить размер сектора углов синтезирования РЛИ с достаточным для практики качеством в 2 раза (до ±30°).

Таким образом, получены экспериментальные результаты, подтверждающие практическую возможность автофокусировки инверсно синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов в широких (десятки градусов) секторах углов локации.

Вместе с тем, необходимо отметить чувствительность автофокусировки РЛИ объектов в широких секторах углов локации к угловой привязке регистрируемых радиолокационных данных, что ограничивает возможность получения сфокусированных изображений в натуральных условиях. Для снятия этого ограничения необходимо изучить, адаптировать к условиям конкретных наблюдений и экспериментально оценить работоспособность алгоритмов автофокусировки, итерационно компенсирующих набеги фаз как от радиального, так и от вращательного движений при неизвестных углах наблюдения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

### Литература

1. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова. – М.: Радиотехника, 2015.
2. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Фокусировка инверсно-синтезированных радиолокационных изображений объектов при измерениях в условиях открытых полигонов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2016. №.6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun16/2/text.pdf>.
3. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скоков П.Н., Скородумов И.А. Способ корректировки диаграмм обратного рассеяния радиолокационного объекта при исключении или снижении уровня отражений от элементов его конструкции // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №.6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.7>
4. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №.8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.8.11>
5. Wang J., Liu X., Zhou Z. Minimum-entropy phase adjustments for ISAR. // Proceedings IEEE – Radar sonar navigation. 2004. Vol.151. No.4. P.203-209.

#### Для цитирования:

Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Результаты инверсного синтезирования двумерных радиолокационных изображений объектов с автофокусировкой в широких секторах углов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.8>