

Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396 : 528.835

ФАЗОВОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ «КОНДОР-ФКА»

Бабокин Михаил Иванович

доктор технических наук; старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

E-mail: m.baboki@hotmail.ru.

Зайцев Сергей Эдуардович

кандидат технических наук; главный конструктор по направлению, директор Объединенной дирекции космических систем АО «ВПК «НПО машиностроения».

Адрес: 143966, г. Реутов, Московская область, ул. Гагарина, д.33.

E-mail: zaisergeri@mail.ru.

Аннотация: Рассмотрены вопросы формирования отражённого от движущегося объекта сигнала в космическом радиолокаторе с синтезированием апертуры антенны (РСА). С использованием математического моделирования исследована реакция многоканального РСА на движение протяжённых объектов. Проведён анализ многосеансовой фазоразностной обработки траекторного сигнала в РСА космического базирования, который позволил установить связь между фазовым отклонением интерферометра и радиальной и тангенциальной скоростью. Приведены результаты экспериментальной отработки алгоритмов по реальным сигналам, показывающие работоспособность и практическую реализуемость предлагаемых методов фазового наблюдения за подвижными объектами. Отмечается, что фазовый портрет (ФП) дает больше информации о движущихся объектах, чем амплитудный портрет. Приведен пример работы временного интерферометра при наблюдении за морскими объектами при их движении с ускорением и при наличии качки. Синтезировано радиолокационное изображение поверхности с железнодорожными путями и автодорогами, которое позволило выявить наличие подвижных целей. Представленные результаты обработки радиолограмм и дешифрирования ФП позволяют рекомендовать их для практической реализации в космическом комплексе «Кондор-ФКА».

Ключевые слова: РЛС с синтезированной апертурой антенны, интерферометрическая обработка, движущиеся объекты.

Введение

Обычно [1, 2], в качестве информационных признаков движущихся наземных объектов используют радиальную и тангенциальную составляющие их скорости относительного движения, а также изменение положения на радиолокационном изображении (РЛИ), а для обнаружения движения по этим признакам используют частотные или пространственно-временные методы. В последнее время [3–8], широкое распространение получили интерферометрические (многоканальные фазоразностные) методы обработки сигналов в РСА. Применению этих методов при фазовом монито-

ринге движения на поверхности посвящена эта работа.

Цель работы – рассмотреть модели сигналов космического комплекса РСА от движущихся объектов, провести анализ алгоритмов многоканального фазоразностного оценивания, а также проверить их работоспособность и практическую реализуемость.

Математическая модель комплекса РСА

Для неподвижного объекта угловое азимутальное положение однозначно ассоциируется с доплеровской частотой отражённого от нее сигнала. Для движущейся цели это однознач-

ное соответствие нарушается, и можно говорить об истинном $\alpha_{до}$ и кажущемся $\alpha_{к} = \alpha_{до} + \delta\alpha$ ее азимутальном положении на РЛИ. Смещение движущегося объекта относительно истинного положения определяется отношением радиальной и тангенциальной скорости движения: $\delta\alpha \approx v_{op}/v_{om}$.

Движение объектов и самой поверхности особым образом проявляется при фазовом мониторинге. Так, функция радиолокационного рассеяния (РЛР) [1] объекта исследования $e_{mn}(x,y,t)$, представляемая в виде дискретной матрицы, каждый m, n -й элемент которой определяется как среднее на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения $\delta x, \delta y$ (в направлении вдоль линии визирования и в ортогональном направлении), изменяется вместе с отражённым сигналом движущегося объекта (с учётом смещения). Это тот самый случай, когда на интервале синтезирования появляется изменение во времени.

Вначале рассмотрим случай, когда по земной поверхности движется точечный отражатель (ТО) со скоростью: $v_o = [v_{op}; v_{om}]$, где v_{op} – радиальная (вдоль линии визирования), v_{om} – тангенциальная (в ортогональном направлении) составляющие скорости. Наблюдение за участком земной поверхности на дальности R_0 при угле падения θ_0 и скорости полёта носителя V осуществляется при боковом или скошенном обзоре [1–5] в течение некоторого времени $t = 0 \dots T$, $T \geq T_c$, T_c – время синтезирования. Многоканальность интерферометра формируется за счёт естественного пролёта одного носителя

РСА (несколько сеансов наблюдения со смещением в доли интервала синтезирования $T_0 \leq T_c / (8 \dots 16)$, см. рис. 1) [6–8].

Дальность от фазового центра антенны до этого ТО, находящегося в одном элементе разрешения, от сеанса к сеансу наблюдения будет изменяться следующим образом:

$$\begin{aligned} r_1(t, v_o) &\approx R_0(t) + x(t) \sin(\theta_0), \\ r_2(\dot{i}, v_o) &\approx R_0(\dot{i}) + \Delta R_0(\dot{i}) + x(\dot{i}) \sin(\theta_0) + \\ &+ x(\dot{i}) \cos(\theta_0) \Delta\theta + y(\dot{i}) \Delta\alpha \sin(\theta_0), \end{aligned}$$

где $\dot{i} = t + T_0$, $x(t) \approx v_{op}t$, $y(t) \approx v_{om}t$, $\Delta R_0(\dot{i})$ – смещение относительно геометрического центра определённого элемента разрешения.

Можно оценить фазовое отклонение интерферометра:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_t &\approx \frac{2\pi}{\lambda} T_c T_0 \left[\frac{V v_{om} \cos(\alpha_0)}{R_0 \sin(\theta_0)} + \sin(\theta_0) v_{op} \right], \\ \Delta\alpha &= \frac{V T_0 \cos(\alpha_0)}{R_0}, \quad \Delta\theta = 0. \end{aligned}$$

Интерферометр "откликается" как на радиальную, так и на тангенциальную скорость движения объекта.

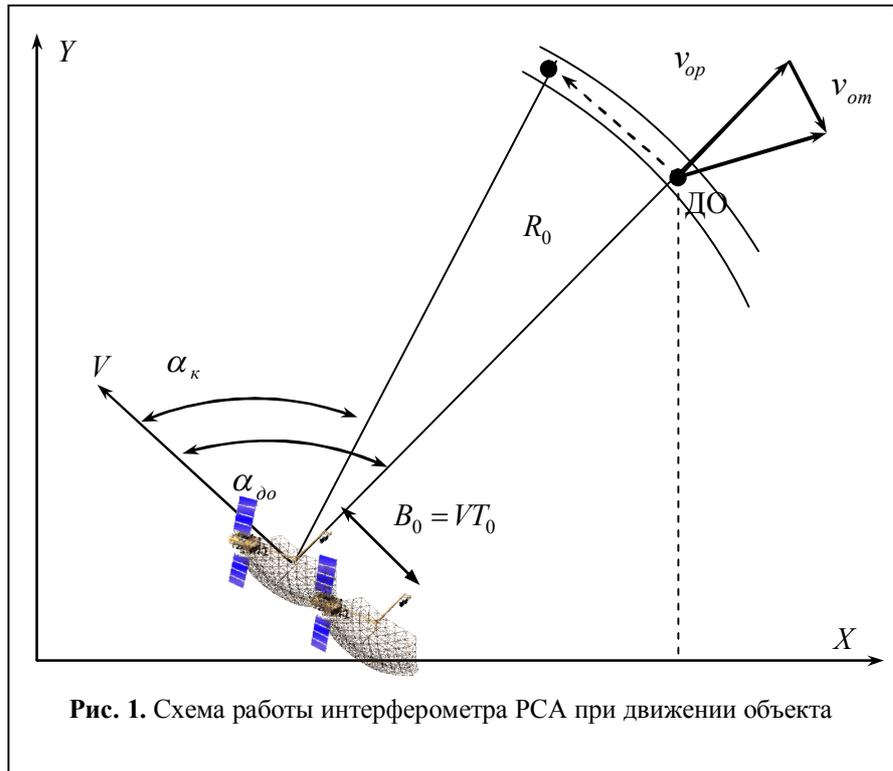


Рис. 1. Схема работы интерферометра РСА при движении объекта

Моделирование и экспериментальная отработка

На рис. 2 представлена реакция (математическое моделирование) многоканального РСА на сигнал ТО при движении с радиальной (10 м/с) и тангенциальной (10 м/с) скоростью. Тангенциальная скорость движения ТО приводит к дефокусировке сигнала и амплитудный отклик РСА расширяется (рис. 2,а). В двух сеансах имеем отклики с линейной частотной модуляцией, немного сдвинутые по частоте. Фазоразностные измерения при этом будут иметь вид знакопеременной «гирлянды» по азимуту, представленный на рис. 2,в.

Радиальная скорость ТО приводит к тому, что принятый сигнал, перемещаясь по стробу дальности, приобретает амплитудную модуляцию на интервале синтезирования. При достаточно высокой скорости сигнал может находиться в одном стробе только часть интервала синтезирования, в остальное время он смеща-

ется в другие стробы.

Это объясняет расширение сигнальной функции РСА (см. рис. 2,б), смещение во времени и частоте (свое для каждого строба). Фазовые отклонения, подобные зависимостям рис. 2,г, будут проявляться в тех стробах, по которым перемещался сигнал. В каждом стробе дальности будет свое закономерное частотное смещение, что выражается в периодическом фазовом отклонении по дальности («гирлянда» по дальности).

Если же движется протяжённый объект, превышающий в несколько раз разрешающую способность, строго говоря, не должно быть выраженной фазовой знакопеременности, поскольку отражённый сигнал формируется из суммы нескольких, смещённых по времени сигналов движущихся ТО, со случайной начальной фазой и сложной фазовой модуляцией.

На рис. 3 представлена реакция (математи-

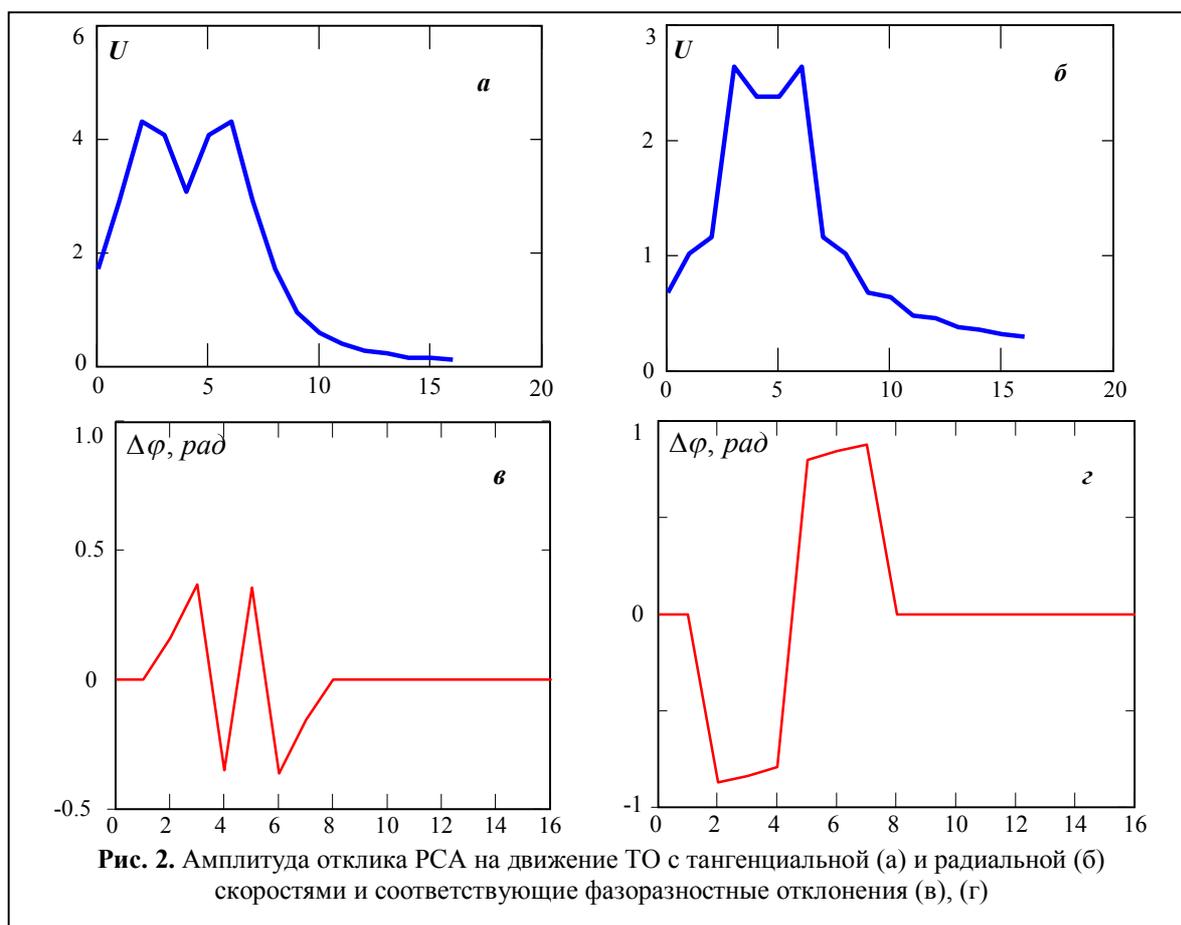
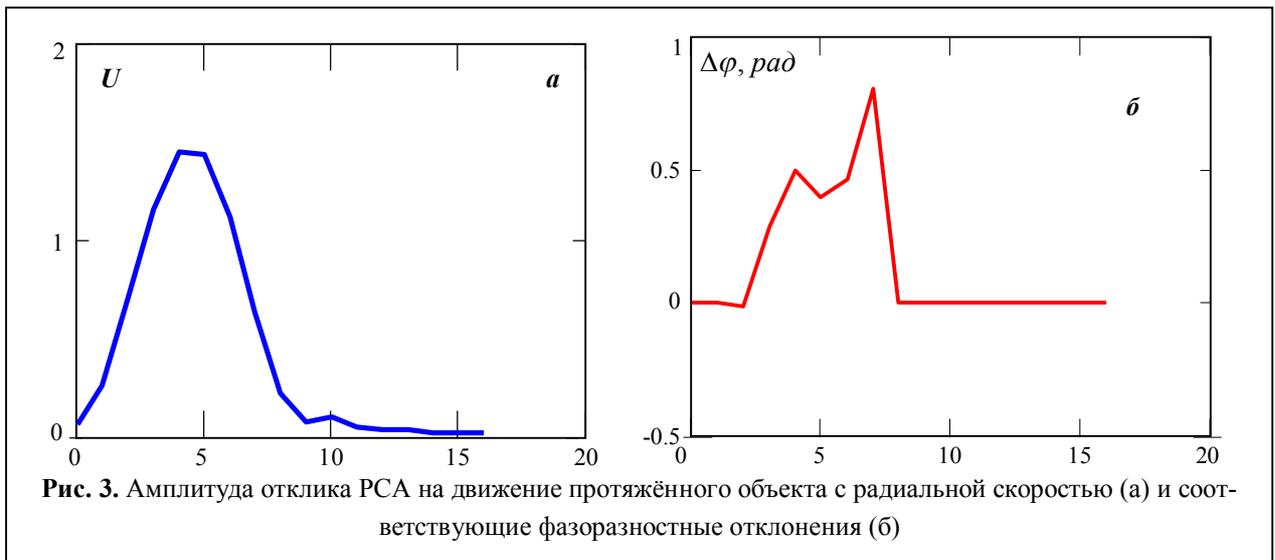


Рис. 2. Амплитуда отклика РСА на движение ТО с тангенциальной (а) и радиальной (б) скоростями и соответствующие фазоразностные отклонения (в), (г)

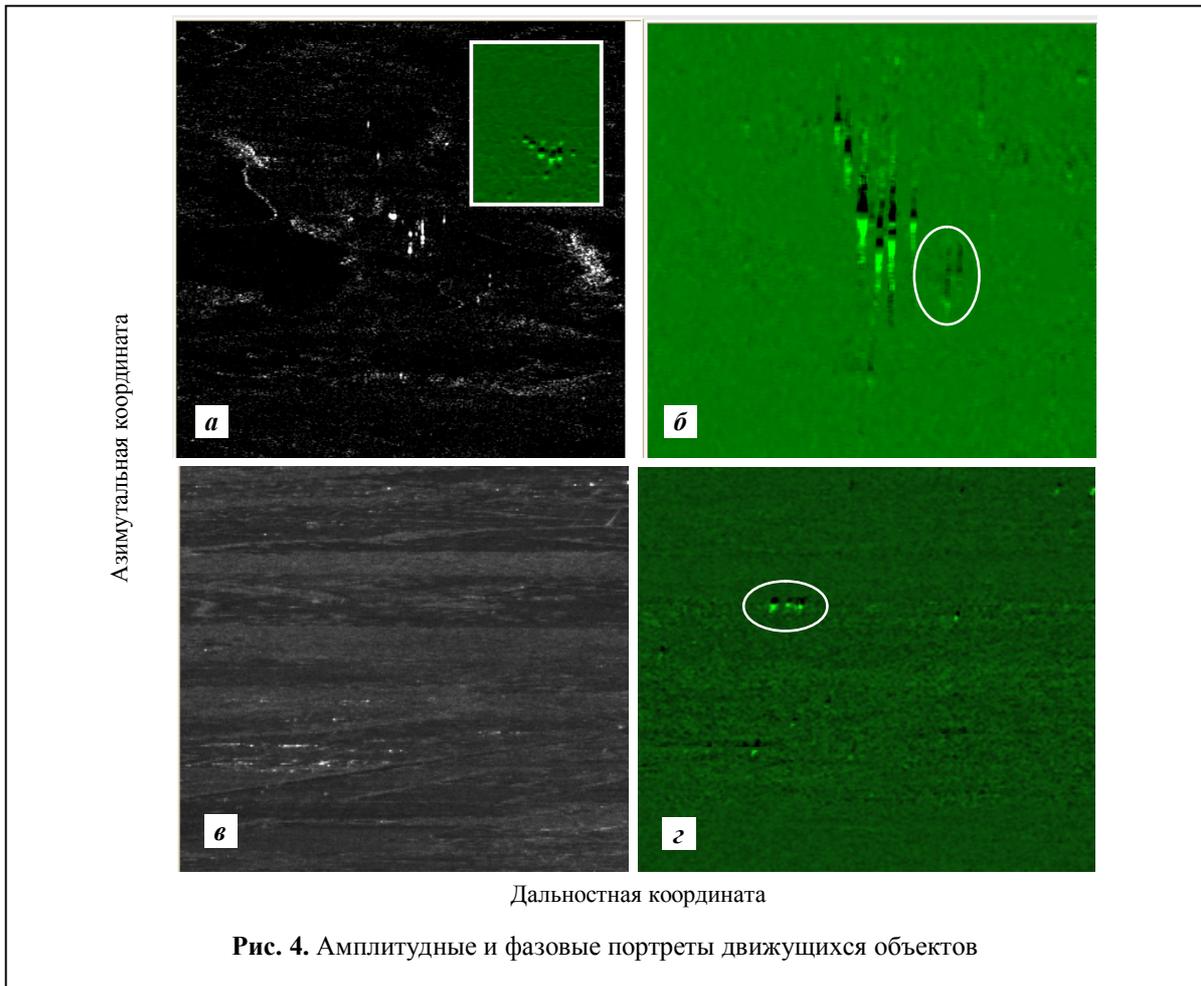


ческое моделирование) многоканального РСА на сигнал от протяжённого объекта при движении с радиальной (10 м/с) скоростью.

Естественным образом «сжимается» сигнальная функция при движении протяжённого

объекта (рис. 3,а), а фазоразностные измерения не отличаются характерной сменой знака.

Детальной экспериментальной отработке в рамках работ по «Кондор-ФКА» подвергались реальные сигналы с последующей отладкой



фазового мониторинга движущихся объектов, подтверждающей результаты математического моделирования.

На рис. 4 представлен пример работы временного интерферометра при обнаружении летящего над землёй объекта типа «Боинг» со значительной тангенциальной скоростью (рис. 4,а – РЛИ и рис. 4,б – фазовый портрет) и объекта, движущегося по земле с радиальной скоростью 20...30 м/с (рис. 4,в – РЛИ и рис. 4,г – фазовый портрет).

В первом случае устойчиво обнаруживается нос и участок фюзеляжа в месте крепления крыльев и двигателя, причём на фоне значительных отражений от земли. Из-за качки крыльев отметки могли сместиться по частоте (помещены в овал на рис. 4,б). Скорее всего, наблюдение производилось при взлёте или посадке самолёта.

Во втором случае фазоразностные отклонения формируют «гирлянду» по дальности, характерную для радиального движения мало-размерного объекта (скорее всего автомобиль), а вот амплитудный портрет в этом случае даёт мало информации об объекте.

На рис. 5 представлен пример работы временного интерферометра, при наблюдении за ускоряющимся протяжённым морским объектом.

Четыре амплитудных и фазовых портрета морского объекта, движущегося с ускорением по дальности, полученных на подинтервалах, в четыре раза меньших, чем весь ИС. Объект достаточно протяжённый, так что по дальности занимает до десятка элементов разрешения.

И по форме сигнала по дальности, и по смещению по азимуту, можно судить, что объект двигался со значительным радиальным ускорением и по мере увеличения скорости на отдельных фрагментах сигнальная форма отклика РСА всё более и более «сжималась». Это соответственно отражается на амплитудном и фазовом портрете. На последнем фрагменте амплитудный отклик объекта почти исчез, в то время как фазовый портрет до сих пор достаточно информативен.

На рис. 6 представлены результаты

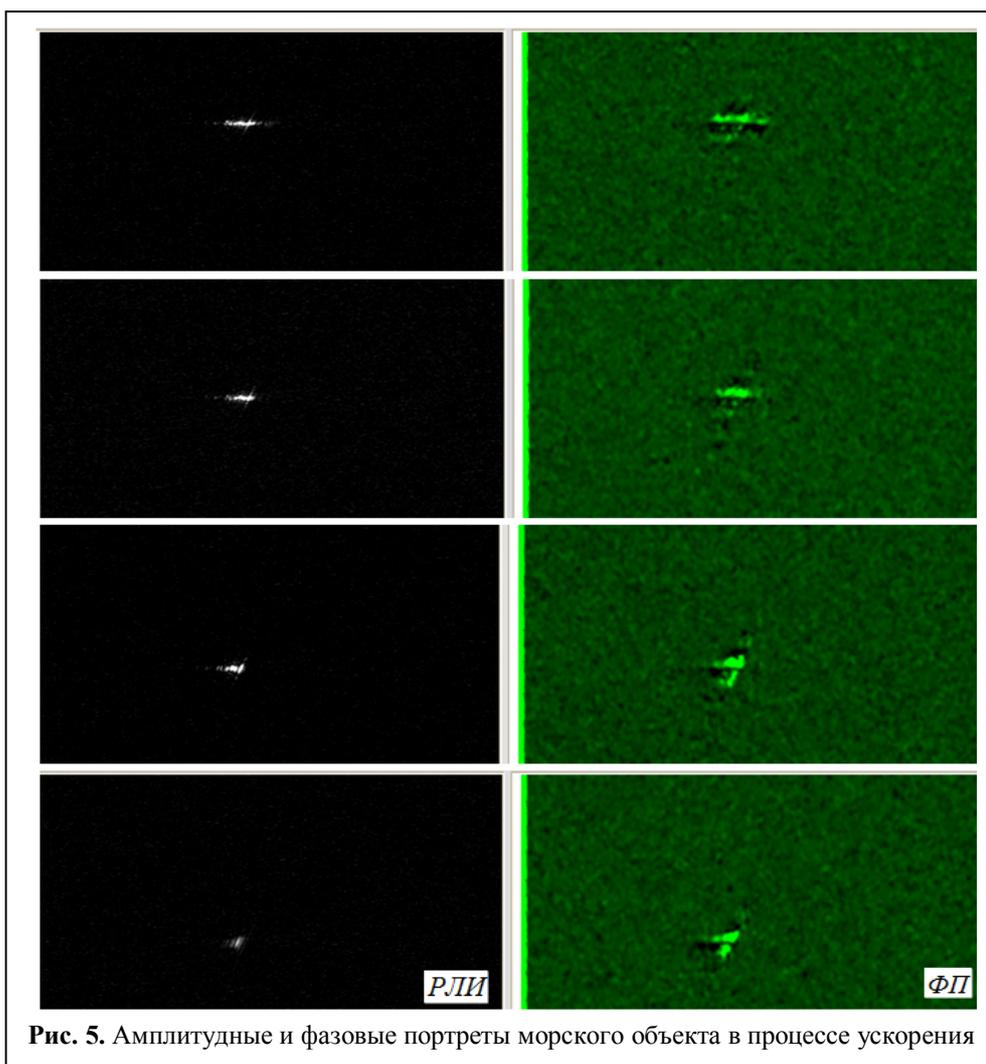


Рис. 5. Амплитудные и фазовые портреты морского объекта в процессе ускорения

наблюдения встречного движения двух крупнотонажных кораблей. Селектор движения был настроен на выделение активного движения. На РЛИ точками обозначен выявленный факт движения. Устойчиво обнаруживаются так называемые "спутные" следы за кораблями (взяты в овале).

На рис. 7 представлен пример работы временного интерферометра при наблюдении за морскими объектами при наличии качки.

Дело в том, что время синтезирования в РСА субметрового разрешения для $\lambda \approx 9$ см достигает единиц секунд, что сравнимо с периодом качки. В данном конкретном случае

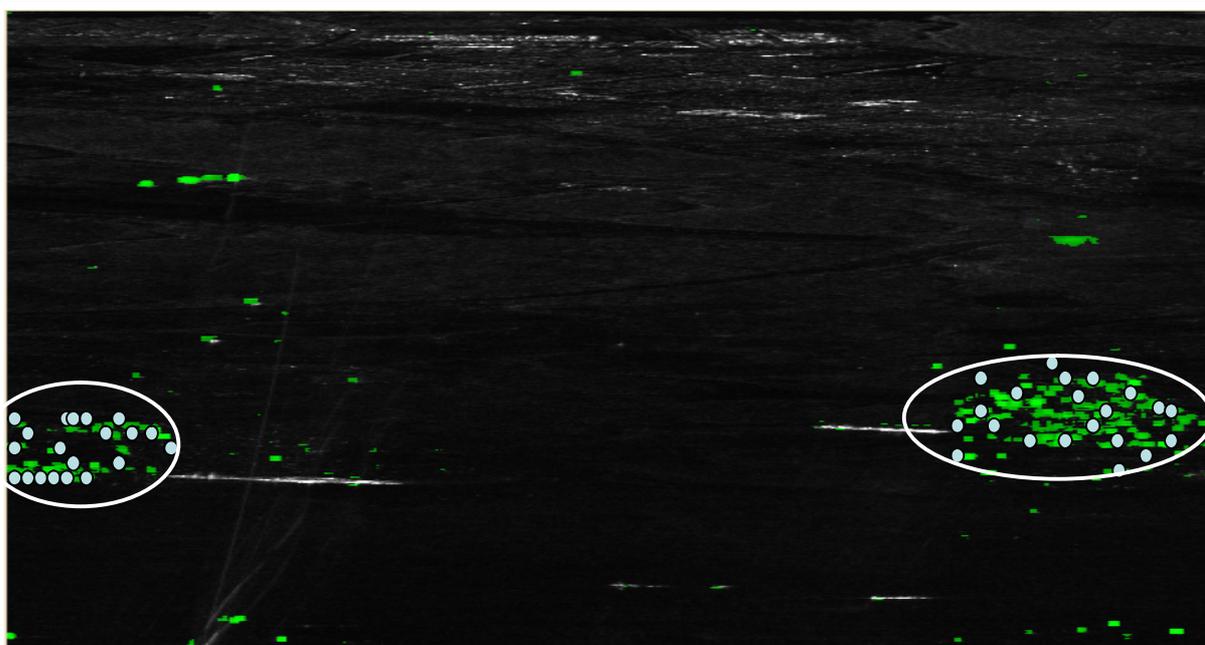


Рис. 6. Радиолокационное изображение и результат работы обнаружителя на базе временного интерферометра

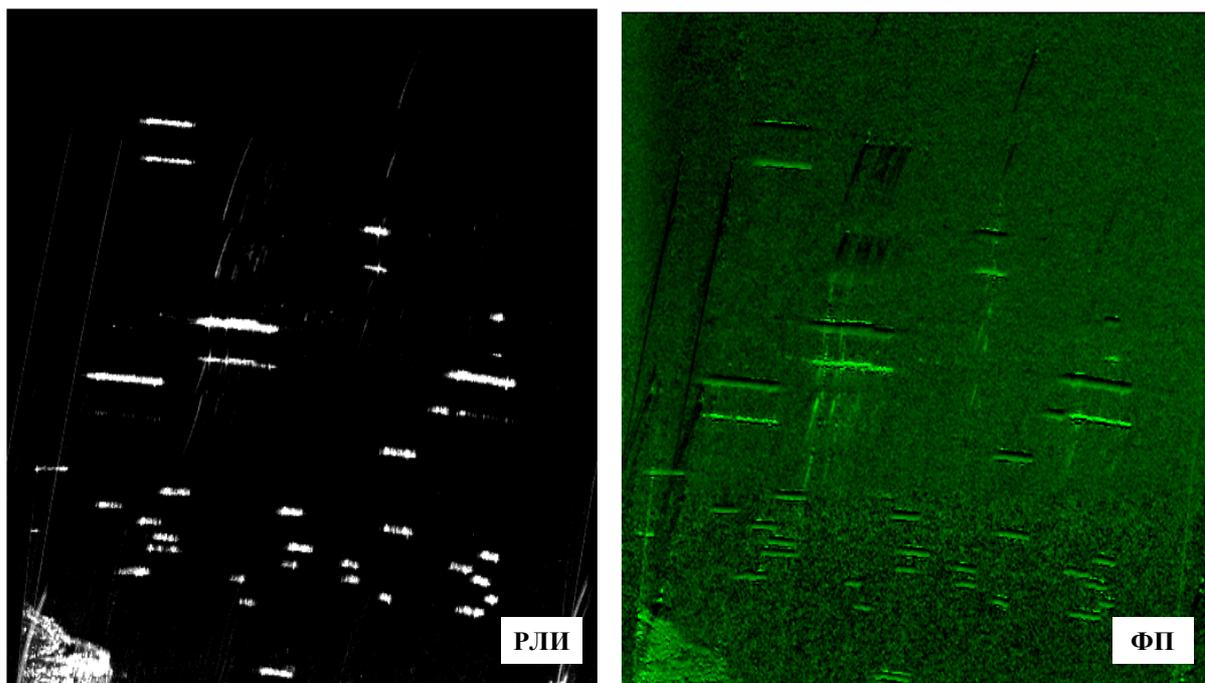


Рис. 7. Амплитудные и фазовые портреты морских объектов при качке

часть интервала синтезирования морская поверхность "поднимала" корабли, другую часть "опускала", или наоборот. То есть в результате РСА обработки отклонение доплеровской частоты сигнала меняет знак и появляется "частотное раздвоение". Причём, чем ближе к берегу, тем величина этого отклонения меньше, что вполне объяснимо. Интересное проявление вызывает собственное радиальное движение объекта: перемещаясь по стробам дальности, он либо поднимается, либо опускается, а это приводит к ступенчатому изменению частоты, яркости, разности фаз. Особенно показательным это явление отображается на фазовом портрете.

На рис. 8 представлено РЛИ фрагмента по-

верхности с железнодорожными путями и автомагистралями. Результат работы селектора движения представлен в виде больших точек, нанесенных на РЛИ.

Устойчиво обнаруживается движущийся поезд и большое количество автомобилей в районе известных автомобильных трасс. Некоторое отклонение по частоте вполне объяснимо радиальным движением в одну и другую сторону. Стрелками помечено истинное положение, которое впоследствии должно быть восстановлено.

Таким образом, в работе представлены положительные результаты отработки алгоритмов многоканального (временного) фазоразно-

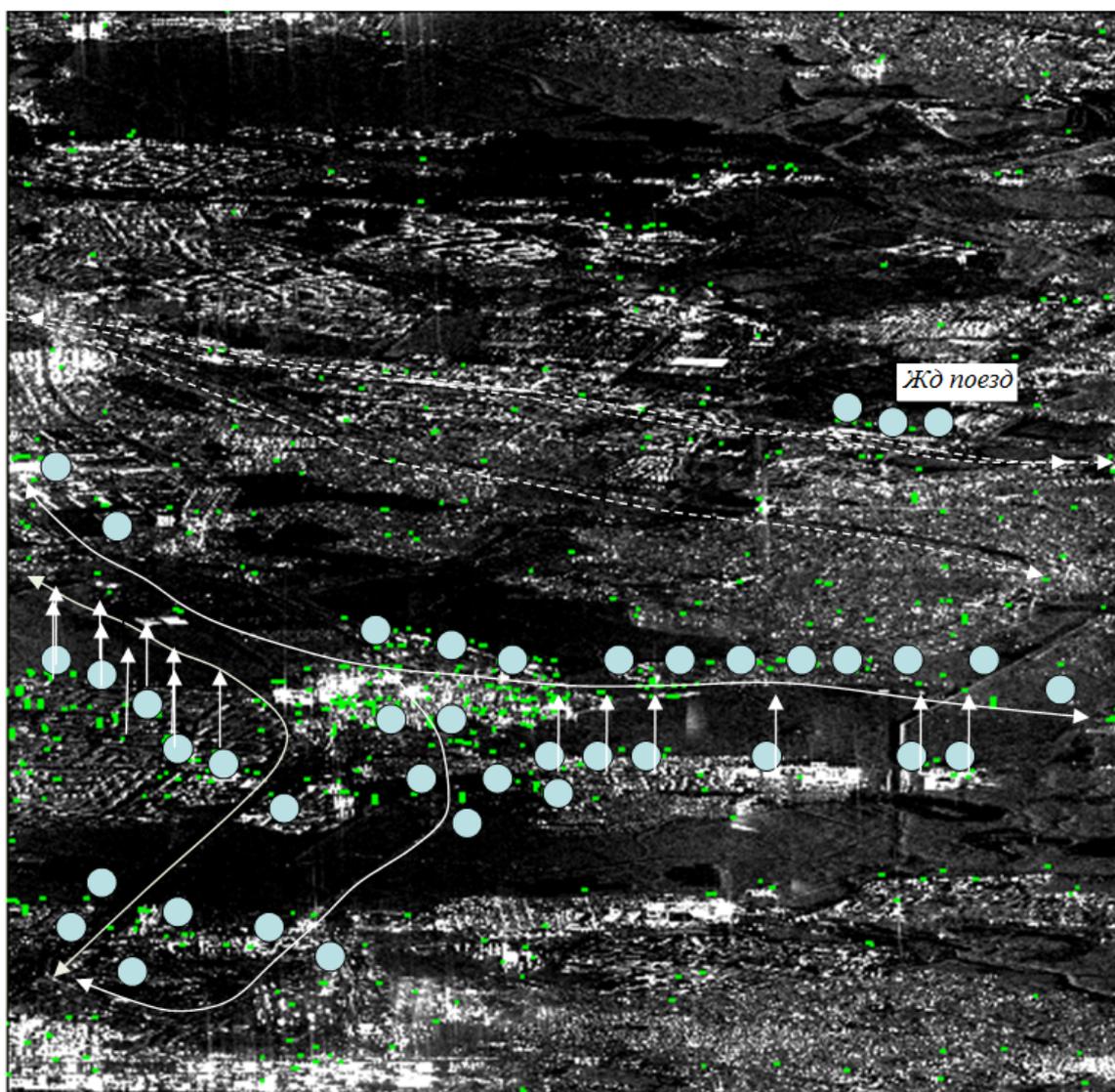


Рис. 8. Радиолокационное изображение и результат работы селектора наземного движения

стного оценивания параметров движения объектов с целью их практической реализации в космическом комплексе "Кондор-ФКА".

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин [и др.] ; под ред. В.Т. Горяинова. М. : Радио и связь, 1988. 304 с.

2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов ; под ред. Г.С. Кондратенкова. М. : Радиотехника, 2005. 368 с.

3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук Э.Г. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования [под ред. В.С. Вербы]. М. : Радиотехника, 2010. 680 с.

4. Бабокин М.И., Карпов О.А. Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с уче-

том его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2008. №1. С. 148–160.

5. Бабокин М.И. Оценка состояния взволнованной морской поверхности с помощью РСА // Радиотехника. 2009. №11. С.5–14.

6. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7. С. 16–20.

7. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся объектов // Радиотехника. 2012. №10. С.65–72.

8. Бабокин М.И., Костров В.В., Толстов Е.Ф. Фазовый портрет в космических РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №4. С. 4–14.

Поступила 5 апреля 2018 г.

English

PHASE OBSERVATION OF THE OBJECT MOVEMENT BY SPACE COMPLEX "CONDOR-FKA"

Mikhail Ivanovich Babokin – Doctor of Engineering; Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: m.baboki@hotmail.ru.

Address: 140180, Russia, Moscow region, Zhukovsky, Zhukovskogo str., 1.

Sergey Eduardovich Zaytsev– Candidate of Technical Sciences; Segment Chief Engineer, Director, Joint Directorate of Space Vehicles of JSC "MIC NPO Mashinostroyeniya".

E-mail: zaisergei@mail.ru.

Address: 143966, Russia, Moscow Region, Reutov, Gagarin str., 33.

Abstract: The article deals with the problems of the moving object echoed signal formation in the space-based SAR (synthetic aperture radar). The stationary object angular azimuthal position is uniquely associated with the Doppler frequency of this object echoed signal. As for a moving object there arises the offsetting with regard to the true position, which depends on the ratio between radial and tangential velocity. The article examines the space-based SAR flight path signal model of moving objects; the correlation is obtained for calculating the interferometer estimated phase deviation; SAR response is given to the point object movement with tangential and radial velocities; the algorithm analysis of multisection (multi-channel) phase-difference processing of flight path signal in space-based SAR is performed. The features of the flight path signal formation from the extended object in multi-channel SAR are examined. It was noted that the phase portrait gives more information on moving objects than the amplitude portrait. The changes of amplitude and phase portraits of the off-shore facility in the range acceleration process are considered. The example of the timed interferometer operation in the observation of the off-shore objects during rocking on the sea is given. The image doubling effect of sea-borne targets in the radar image and the phase portraits is marked. The radar image of the surface railway lines and roads with available moving targets is presented. The given results of modeling and experimental development of algorithms for actual signals demonstrate the efficiency and feasibility of the proposed methods of the moving object phase observation. The presented results of processing RF holograms and decrypting phase portraits (PP) enable to recommend them for practical implementation in the space complex "Condor-FKA".

Key words: synthetic aperture radar, interferometric processing, moving objects.

References

1. Digital synthetic aperture radars / *V.I. Antipov, V.T. Goryainov, A.N. Kulin* [and other colleagues]; ed. by *V.T. Goryainov*. Moscow : Radio i svyaz, 1988. 304 p.
2. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radio vision. Radar systems of Earth remote probing. Textbook for Higher Educational Institutions ; ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
3. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk E.G.* Space-based radar systems for Earth viewing [ed. by *V. S. Verba*]. Moscow : Radiotekhnika, 2010. 680 p.
4. *Babokin M.I., Karpov O.A.* Signal detection in the underlying surface by radar in view of its fluctuations in the synthesis interval // Problems of radio electronics. RLT series. 2008. No. 1. Pp. 148–160.
5. *Babokin M.I.* Status estimation of the confused sea surface via SAR // Radiotekhnika. 2009. No. 11. Pp. 5–14.
6. *Babokin M.I., Efimov A.V., Karpov, O.A., Titov M.P.* The one-pass interferometer in the stripmap mode // Radiotekhnika. 2014. No. 7. Pp. 16–20.
7. *Babokin M.I., Tsvetkov E.O.* SAR signal interferometric processing algorithms in the identification of moving objects // Radiotekhnika. 2012. No. 10. Pp. 65–72.
8. *Babokin M.I., Kostrov V.V., Tolstov E.F.* Phase portrait in space SAR radiovision // Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. 2017. No. 4. Pp. 4–14.