

# Радиолокационные и радионавигационные системы

УДК 621.396: 528.835

## Фазовый портрет в космических РСА радиовидения

### **Бабочкин Михаил Иванович**

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

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

### **Костров Виктор Васильевич**

доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника»

Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

*E-mail:* vvk@mit.ru.

*Адрес:* 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, д.23.

### **Толстов Евгений Федорович**

доктор технических наук, профессор, начальник отдела ЗАО «АЭРОКОН».

*E-mail:* E\_tolstov@mail.ru.

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

*Аннотация:* В статье приведён сравнительный анализ вариантов формирования фазовых портретов с помощью радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА). Фазовые портреты формировались различными способами: по оценкам начальных фаз (статический фазовый портрет); по оценкам разности фаз сигналов, перекрывающихся во времени (динамический фазовый портрет); по оценкам разности фаз сигналов, перекрывающихся по спектру (статический фазовый портрет). Рассмотрены примеры фазоразностных портретов, построенных на основе экспериментальных данных, выявлен ряд эффектов, которые позволяют получить новую информацию об объектах наблюдения. Показано, что отличающиеся по высоте объекты на динамическом фазоразностном портрете выглядят более объёмно и детально, а шумы неоднозначности по азимутальной координате в таком портрете исчезают. Аналогичный эффект обнаружен для движущихся объектов, особенно при наличии на объектах крупных вращающихся деталей (например, антенн РЛС с механическим вращением) или при наличии периодических колебаний самих объектов (например, качки на волнах). В результате проведённых исследований показано, что фазовое портретирование позволяет расширить возможности РСА радиовидения по всем направлениям функционирования и режимам съёмки.

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, радиовидение, радиолокационное изображение, фазовый портрет, динамический портрет, статический портрет, неоднозначность по азимуту.

## Введение

В декабре 2014 года в России на орбиту был выведен малый космический аппарат (КА) «Кондор-Э», который имел на борту радиолокатор с синтезированной апертурой антенны (РСА) [1,2]. КА «Кондор-Э» запущен в интересах иностранного заказчика с космодрома Байконур [3]. Головным разработчиком КА является АО «ВПК «НПО машиностроения», а разработчиком РСА – АО «Концерн радиостроения «Вега». За полтора года до этого АО «ВПК

«НПО машиностроения» был запущен первый КА радиолокационного наблюдения высокого разрешения [4]. Главной задачей запуска [3,4] малых КА серии «Кондор-Э» была отработка бортовой и наземной аппаратуры синтеза радиолокационных изображений (РЛИ), а также последующая эксплуатация с получением информации из космоса. Финальным этапом разработки РСА малого КА серии «Кондор-Э» стали их лётные испытания, результаты которых представлены в работе [5]. По ходу испы-

таний удалось проверить некоторые новые режимы работы и исследовать способы обработки, среди которых особое место занимает процедура формирования и анализ свойств фазового портрета, предсказанного ещё в [6].

С целью решения широкого спектра пользовательских задач в РСА серии «Кондор-Э» (S диапазон) реализован традиционный для космических РСА набор режимов работы:

1) детальный прожекторный (ДПР) максимального (1...2 м) разрешения при РЛИ в виде кадра местности  $10 \times 10 \text{ км}^2$ ;

2) детальный непрерывный (ДНР, разрешение 1...3 м) для съёмки на маршруте при РЛИ в виде полосы местности шириной до 30 км;

3) обзорный (ОР, разрешение 6...12 м, полоса захвата до 100 км) на основе широкозахватного вида обзора сравнительно низкого разрешения (ScanSAR).

Поскольку радиовидение определяется как наблюдение объектов в радиодиапазоне волн с детальностью оптических систем, работающих в видимом диапазоне волн, РСА КА «Кондор-Э» можно отнести к средствам радиовидения.

Цель данной работы – анализ вариантов создания фазовых портретов при наблюдении земной и водной поверхности в ходе лётных экспериментов с РСА малого космического аппарата «Кондор-Э».

Отметим, что КА «Кондор-Э» является собственностью иностранного заказчика, и все материалы, включая снимки РЛИ, публикуются с его разрешения. Кроме того, следует иметь в виду такую особенность: далее изображения показаны в координатах «наклонная дальность – горизонталь, азимут – вертикаль» без геометрической и радиометрической коррекции.

### Фазовые портреты

Известно [1,2,7], что получаемые в РСА радиолокационные изображения (РЛИ) передают характерные особенности местности и объектов благодаря их различиям в функции отражения. Функция отражения и её оценка являются комплексными, содержащими действительную и мнимую составляющие, а РЛИ обычно пред-

ставляется модулем оценки. Следовательно, в процессе обработки радиолограммы формируется так называемый *амплитудный портрет*, то есть такое изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна амплитуде сигнала, отражённого от соответствующего разрешаемого участка местности и объектов. При этом фаза сигнала РЛИ, так же как и амплитуда, содержащая определённую информацию, не используется. *Фазовый портрет* – это изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна фазе сигнала, так или иначе связанного с сигналом РЛИ, отражённого от соответствующего разрешаемого участка подстилающей поверхности.

Вернёмся к классификации фазовых портретов, приведённой в [6]. Ясно, что движение объектов, изменение их отражающих свойств во времени, по поляризации, частоте и координатам определяются не только амплитудными различиями, но и *фазовыми*. Следовательно, можно формировать изображения, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов разных каналов РСА соответствующего разрешаемого участка отражающей поверхности. В связи с этим различают *статический фазовый портрет* и *динамический фазовый портрет* [6]. Часто такие портреты называют *фазоразностными*. Это позволяет в названии отразить, по какому параметру разнятся каналы.

*Статический фазовый портрет* – это радиолокационное изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна начальной фазе функции отражения соответствующего разрешаемого участка поверхности или разности фаз функции отражения в двух каналах обработки траекторного сигнала (например, каналов дальности, доплеровских, пространственных, поляризационных каналов). Этот метод позволяет обнаружить изменение отражающих свойств элементов разрешения РСА, например, вследствие их различных диэлектрических свойств. Отметим, что статические фазоразностные портреты формируются по сигналам, относящимся к одному и тому же моменту времени.

*Динамический фазовый портрет* – это радиолокационное изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов двух разнесённых во времени (а также в пространстве и времени и т.п.) каналов РСА соответствующего разрешаемого участка поверхности. Динамический фазовый портрет (ДФП) чувствителен к изменению фазы функции отражения во времени. Это изменение может быть обусловлено движением отражающей поверхности либо изменением её свойств.

Рассмотрим примеры амплитудных (РЛИ) и фазовых портретов. На рис. 1 показано РЛИ авиабазы ВВС США «Девис-Монтен» (Davis-Monthan Air Force Base), расположенной в черте города Таксон, штат Аризона. Радиолокационный снимок произведён РСА КА «Кондор-Э» в ДПР. Амплитудный и фазовый портреты типового фрагмента окрестностей этого аэродрома приведены на рис. 2 (а,б,в,г).

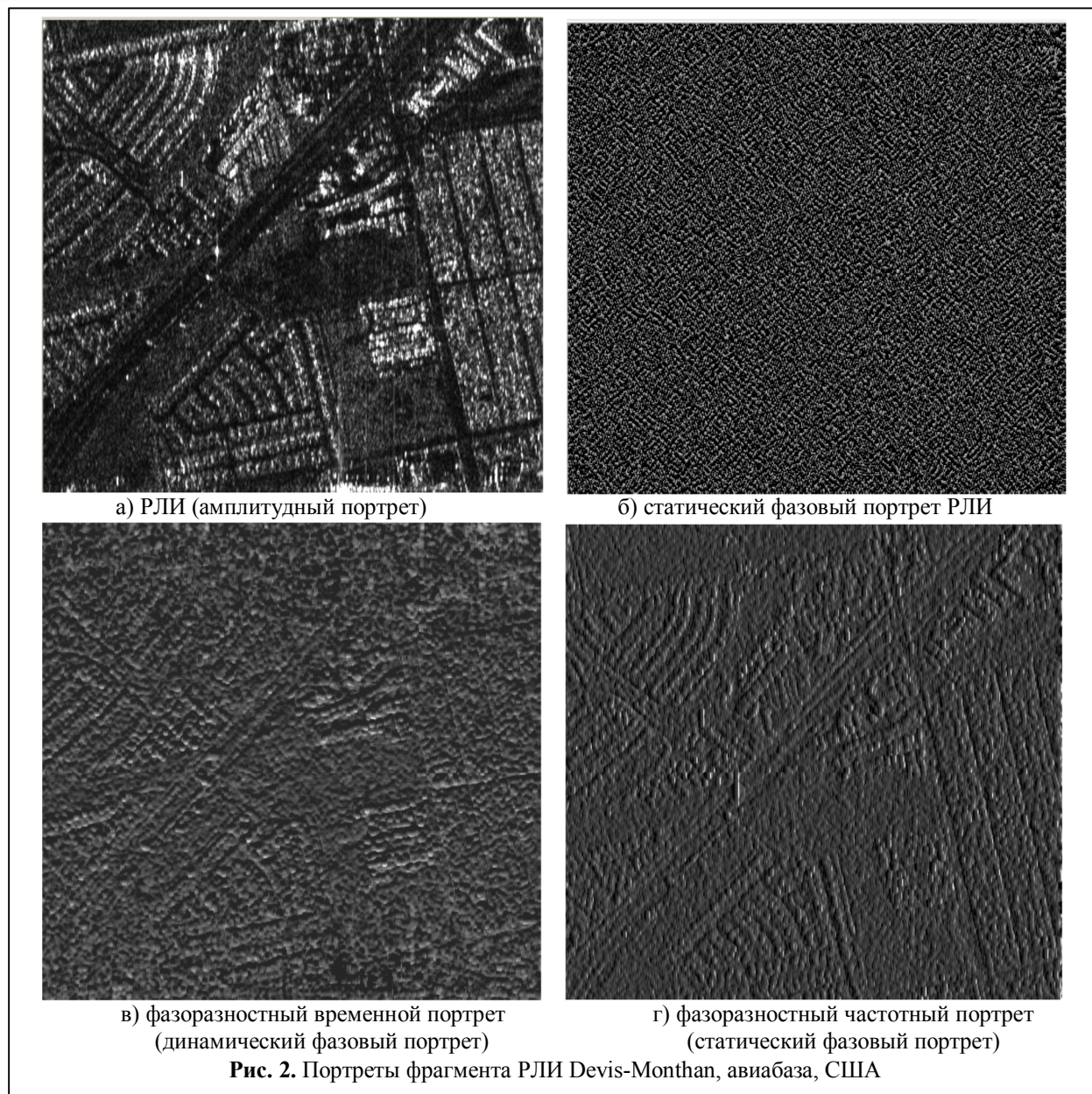
На рис. 2 (а,б) представлены РЛИ (модуль сигнала) и картина распределения начальных фаз

изображения выбранного фрагмента окрестностей аэродрома. По выше приведённой классификации фазовый портрет, показанный на рис. 2 (б), следует отнести к статическим. При сравнительном анализе картин на рис. 2 (а,б,в,г) может показаться, что амплитудный портрет (РЛИ) более информативен, чем фазовый портрет. Однако анализ фазовых портретов приводит к мысли о несомненно более сложной его структуре и, в связи с этим, необходимости использования более сложных приёмов извлечения из них информации. Современное состояние СВЧ техники и технологии синтеза апертуры таково, что позволяют решать задачу амплитудного радиовидения [1, 2], но при формировании фазовых портретов более понятными оказываются фазоразностные портреты.

На рис. 2 (в,г) представлены фазоразностные портреты: динамический (в) и статический (г). Динамический фазоразностный портрет рис. 2 (в) формировался по следующей алгоритмической схеме: наблюдение за авиабазой произво-



Рис. 1. ДПР РСА КА «Кондор-Э», РЛИ Devis-Monthan, авиабаза, США



дилось некоторое время, превышающее время синтезирования на  $T_0 \approx 0,1$  с, что позволило организовать два перекрывающихся сеанса наблюдения, следующих через интервал  $B_0 \approx 700$  м, при величине интервал синтезирования (ИС)  $X_c \approx 10000$  м. Два ИС перекрывались более чем на 90%, и это гарантировало высокую степень корреляции сигналов.

Затем по информации каждого ИС, с применением техники синтезирования апертуры, были сформированы две матрицы комплексных сигналов РЛИ. Каждый элемент второй комплексной матрицы за счёт фазовой коррекции искус-

ственно приводится к одному моменту времени относительно соответствующего элемента первой матрицы, а затем, после комплексного сопряжения и фильтрации, формировалась динамическая фазоразностная матрица, представленная на рис. 2 (в).

Статический фазоразностный портрет рис. 2 (г) отличается одновременностью формирования пары комплексных матриц. Рассмотрим частотный способ, применённый в работе. По информации одного ИС с использованием техники синтезирования апертуры была сформирована комплексная матрица сигнала РЛИ. Затем, путём

преобразования Фурье по дальности, был обеспечен переход в частотную область. Весовая обработка спектра по дальности со смещением «центральной» частоты, позволила получить два сигнала с перекрывающимися более чем на 90% спектрами. Пара разночастотных сигналов была получена с помощью обратного преобразования Фурье и возврата во временную область. После комплексного сопряжения, согласованной фильтрации и определения фазы был сформирован статический фазовый портрет (частотная фазоразностная матрица, рис. 2 (г)).

В работах [9, 10] представлен общий вариант квазиоптимального по критерию минимума СКО алгоритма оценивания многопозиционного комплекса РСА в приложении оценки местного рельефа. В нашем случае, по существу, ставится задача оценки смещения фазового центра переотражения каждого элемента разрешения. Впрочем, и то, и другое базируется на поэлементной в координатах  $x, y$  оценке фазовой разности парных сигналов  $\Phi(x, y)$  комплексного сигнала РЛИ:

$$\Phi(x, y) = \arg \left\{ \hat{e}_1(x, y) \hat{e}_2(x, y)^T \right\}.$$

Такой математический приём используется в ряде приложений (см. [8–14]). Дело в том, что на разных частотах ЭМВ, при разных ракурсах и

сеансах наблюдения – вид и значения матриц оценки радиолокационного рельефа (РЛР), т.е. комплексных РЛИ  $\hat{e}_1(x, y), \hat{e}_2(x, y)$ , имеет свою специфику, которая несёт информацию не только о свойствах объекта, но об их изменениях через относительные фазовые отклонения комплексной функции РЛР. Рассмотрим примеры фазовых портретов, полученных по изложенным методикам, выбрав из полученных в ходе лётных испытаний наиболее характерные.

### Примеры фазовых портретов

Возвращаясь к рис. 2, следует отметить, что на первом фазоразностном портрете (рис. 2 (в)) более явно, чем на амплитудном портрете, выделяются возвышающиеся строения, контрастные естественные и искусственные объекты. Этот фазовый портрет сформирован при скошенном обзоре (угол скоса  $\alpha_0 \approx 1^\circ$ ). На втором фазоразностном портрете (рис. 2 (г)), сформированном по схеме разночастотного интерферометра, выделяются вышки, высотные здания, мосты. В этом случае знакопеременные фазовые отклонения, пропорциональные амплитудному и высотному контрасту объектов, направлены по дальности. Можно отметить также, что разночастотный интерферометр (рис. 2 (г)) формирует два (или более) каналов *одновременно*, в результате

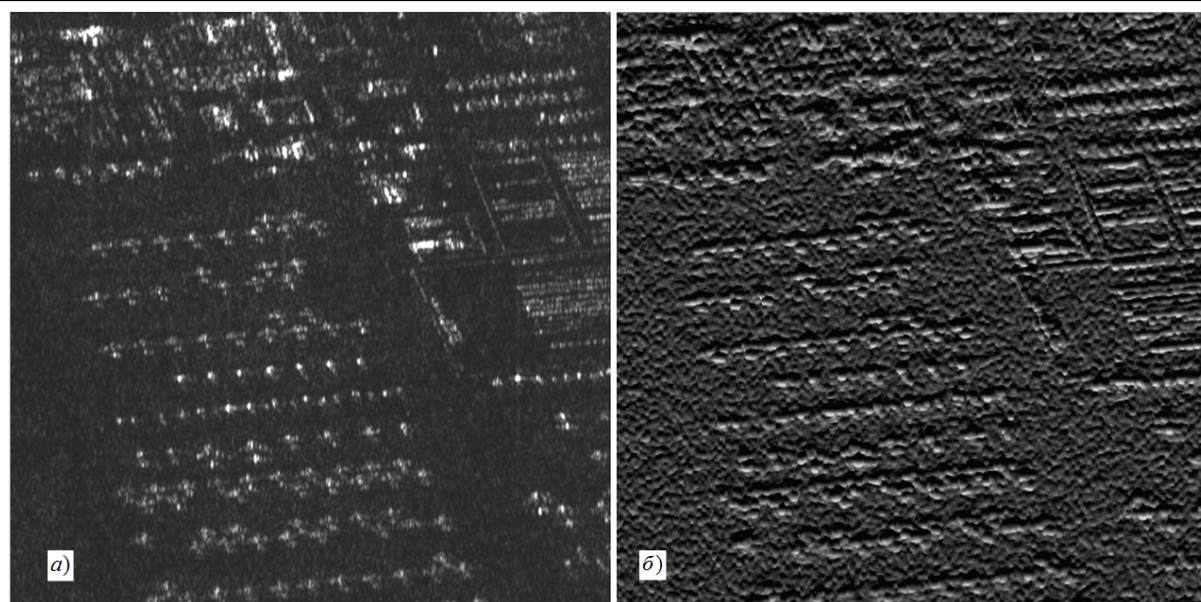


Рис. 3. РЛИ стоянки самолётов и её динамический фазовый портрет

этого на фазовом портрете меньше шумов декорреляции и выше детальность представления, хотя временной интерферометр более чувствителен к временным и высотным проявлениям, особенно при скошенном обзоре.

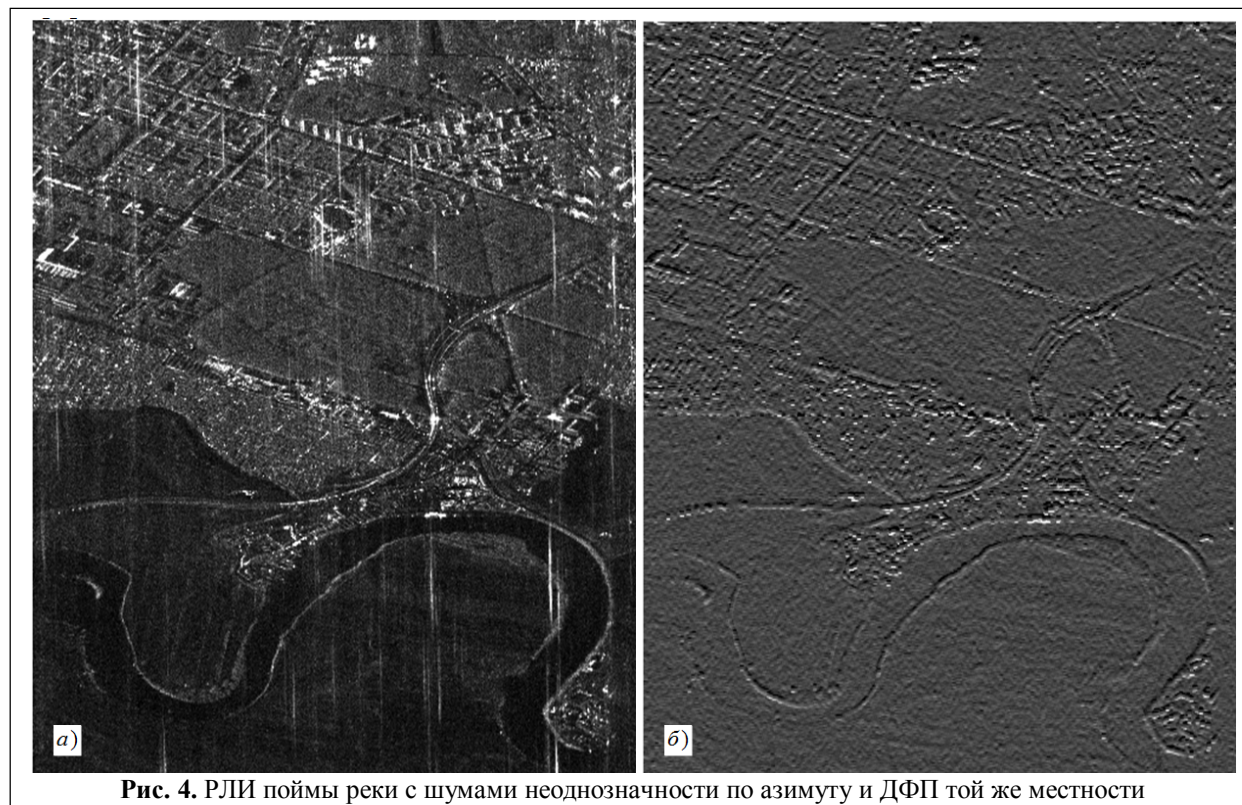
Конечно, разнообразных вариантов фазовых портретов, связанных с видом портрета, углом скоса, а также параметрами сдвигов радиоголограмм и видов фильтрации, огромное множество. Но это говорит лишь о том, что в анализе фазовых портретов заложено множество ответов на вопросы, связанных с подробностями сюжетов съёмки.

Математический анализ поведения фазы в случае использования представленных выше способов позволяет предсказать характерные особенности статических и динамических портретов. В дополнение к этому проведённое моделирование, подтвердившее выдвинутые положения, связанные с формированием динамических фазовых портретов, предоставляет возможность сформулировать некоторые признаки, связывающие свойства местности и объектов с картинами фазовых портретов. Приводимые ниже примеры изображений показывают, что фазовые

портреты всегда дают дополнительную информацию по отношению к РЛИ. Для динамических фазовых портретов выявленные к настоящему времени свойства ДФП сводятся к следующему:

1) Все отличающиеся по высоте объекты на временных фазоразностных портретах выглядят более объёмно и более детально. Примером может служить динамический фазовый портрет стоянки самолётов, представленный на рис. 3. Здесь на рис. 3 (а) показано РЛИ стоянки, а на рис. 3 (б) – фазовый портрет. Это фрагмент РЛИ, показанного на рис. 1. Каждый объект, имеющий по отношению к фону перепад высот, сопровождается провалом и всплеском яркости, что и придаёт изображению объекта некую объёмность.

2) Шумы неоднозначности по азимуту, проявляющиеся на РЛИ, на динамическом фазовом портрете исчезают. Это показано на рис. 4, где на рис. 4 (а) помещено РЛИ поймы реки, а на рис. 4 (б) – динамический фазовый портрет той же местности. Конечно, снимки по виду портретов совершенно различны, но совместный их анализ облегчён отсутствием шумов неоднозначности на фазовом портрете.



**Рис. 4.** РЛИ поймы реки с шумами неоднозначности по азимуту и ДФП той же местности

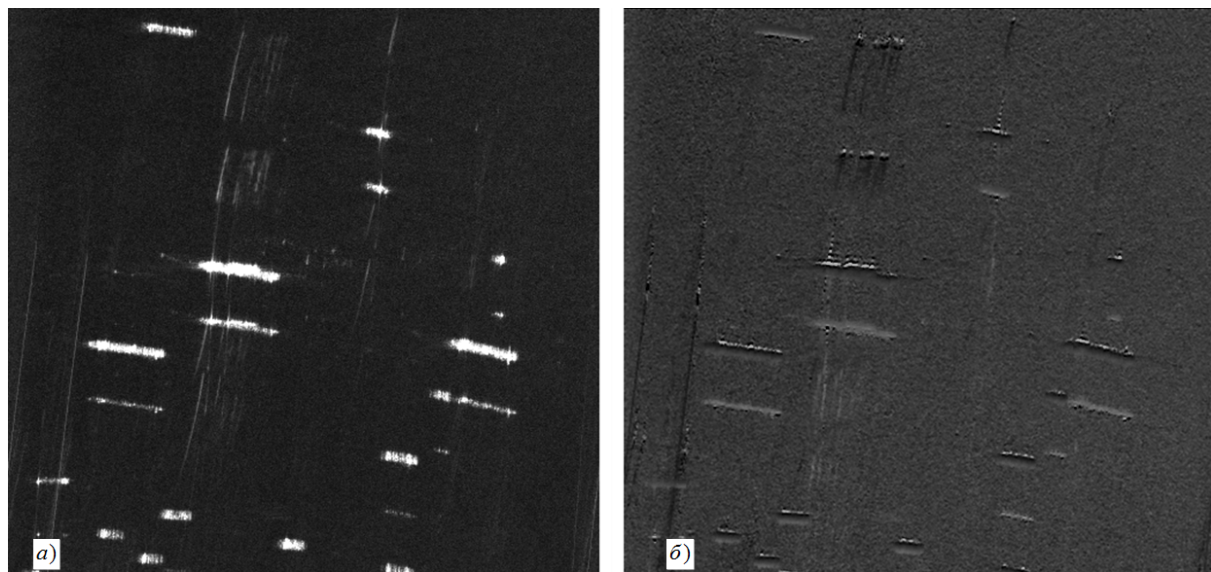


Рис. 5. Двоение изображения кораблей

3) Двоение изображений кораблей (возможно, из-за качки) и сложности обнаружения этого факта по РЛИ иллюстрируется рис. 5. Дей-

ствительно, правильно подсчитать количество кораблей на РЛИ и даже обнаружить факт их двоения (рис. 5 (а)) представляется очень слож-

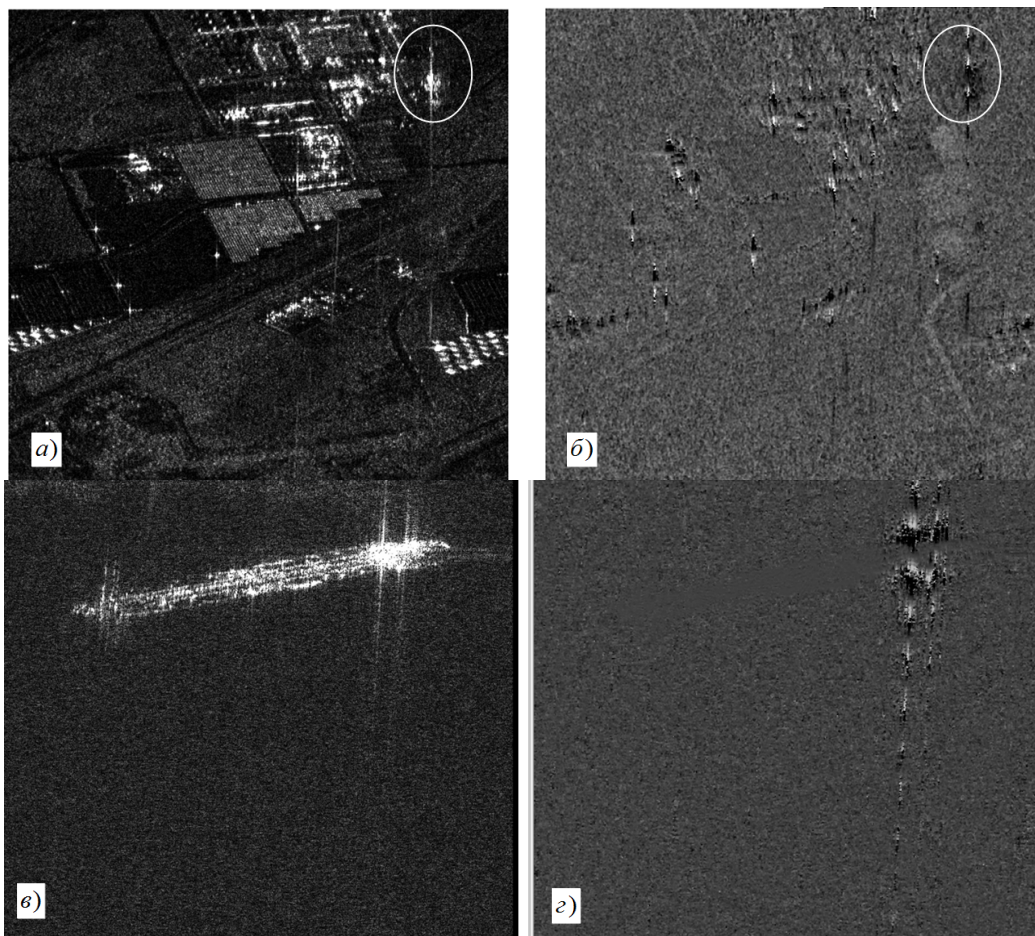


Рис. 6. Объекты с механическим вращением

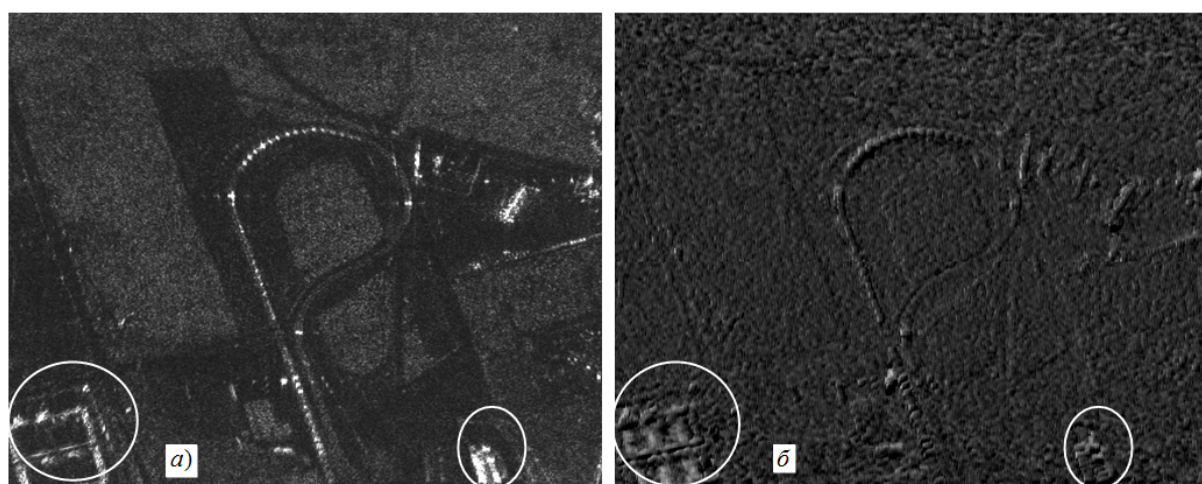


Рис. 7. Амплитудные и динамический фазовые портреты (с повышенной детализацией) района аэродрома

ным. Однако на ДФП той же сцены (рис. 5 (б)) отличить изображение корабля от его двойника гораздо проще, чем по РЛИ.

4) Изображение объектов с механическим вращением (например, антенн наземных или корабельных РЛС) часто на РЛИ сложно отличить от мощных отражающих элементов объекта, порождающих заметные на изображении линии боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности антенны. Такие явления возникают в первую очередь при съёмках аэродромов и кораблей. Именно такого рода изображения и показаны на рис. 6.

Так, на рис. 6 (а, б) показаны РЛИ и динами-

ческий фазовый портрет фрагмента аэродрома, изображение которого приведено на рис. 1. Здесь в правом верхнем углу рис. 6 (б) хорошо видна так называемая «гирлянда», представляющая собой фазовый портрет вращающейся антенны (см. соответствующее место РЛИ на рис. 6 (а)). Особенно показателен фазовый портрет (предположительно) контейнеровоза (рис. 6 (в) – РЛИ, рис. 6 (г) – ДФП). Здесь удалось подобрать параметры ДФП такими, что корпуса контейнеровоза вместе с изображениями мощных отражателей на баке и их боковыми лепестками практически не видно. Вместе с тем, хорошо выделяются изображения вращающихся антенн в кормо-

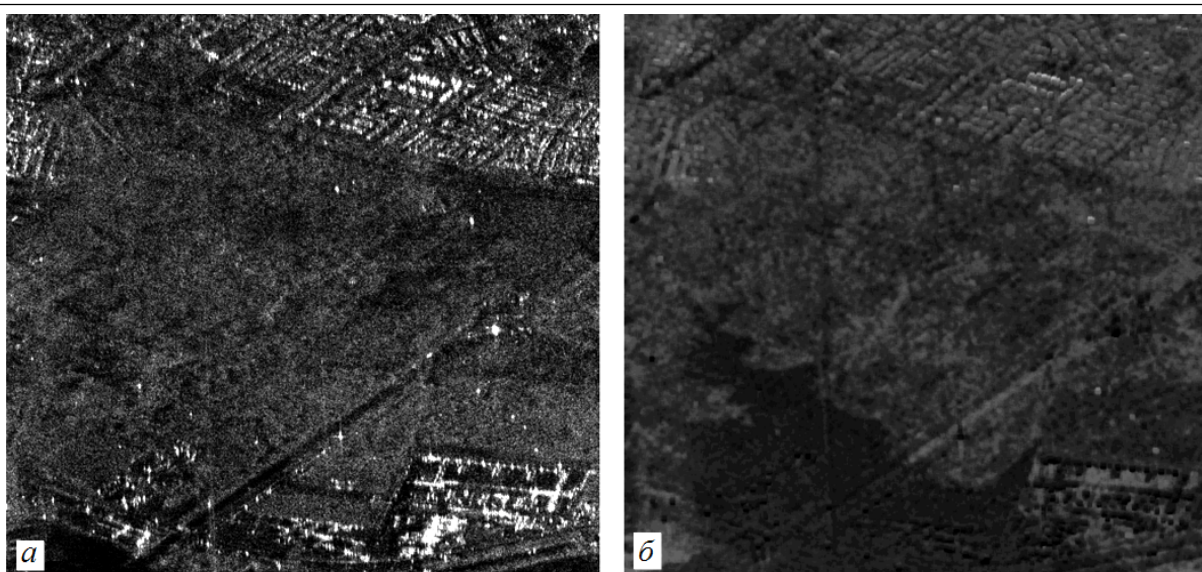


Рис. 8. Фрагмент РЛИ и ДФП окраины города с границами естественных образований



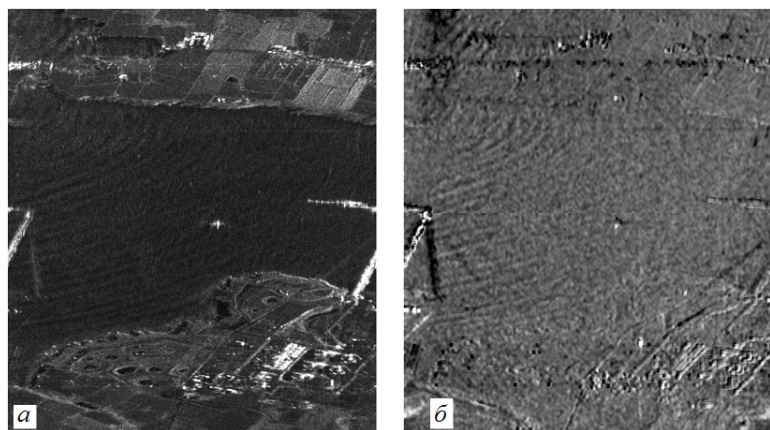


Рис. 9. Фрагмент РЛИ и ДФП взволнованной морской поверхности

вой части судна.

5) Фазовый портрет по отношению к амплитудному более чувствителен к резким перепадам ЭПР или высоты. Это часто позволяет увидеть на фазовом портрете то, что на РЛИ в силу разных причин смазано или вообще не проявляется. Так, на рис. 7 (а, б) показано РЛИ и ДФП фрагмента аэродрома (Devis-Monthan, авиабаза, США). В нижней части снимка, в правом и левом углу на РЛИ и ДФП овалами отмечены части изображений, детальность в которых хорошо вскрывает фазовый портрет.

6) Иногда по РЛИ очень трудно определить границы естественных образований, например, леса и поля, сухой и мокрой почвы, посадок различных культур. На рис. 8 (а, б) иллюстрируется как раз такой случай. По фазовому портрету (рис. 8 (б)), возможно, легче будет найти границу разделов. Однако, если вернуться к рис. 7 (в) следует обратить внимание на то, что граница фонов, которые хорошо различаются на РЛИ, в центре сюжета на фазовом портрете находится с трудом. Это означает, что параметры формирования фазового портрета для этой задачи оказались не подходящими.

7) Структура морского волнения сохраняется на ДФП (см. рис. 9 (а, б)). На рис. 9(а) показано РЛИ, а на рис. 9 (б) – ДФП той же сцены, представляющей собой участок морского залива. На ДФП видна структура морского волнения, хотя и не столь явственно, как на РЛИ. Вместе с тем, на поверхности моря и суши выявляются неожиданные объекты и их элементы, которые почти не видны на РЛИ.

### Заключение

1. Свойства фазовых портретов столь глубоки, разнообразны и слабо изучены, что при инте-

ресе к ним позволяют надеяться на расширение возможностей РСА радиовидения по всем характеристикам и направлениям функционирования.

2. Особый интерес представляет использование фазовых портретов при наблюдении вращения неизлучающих антенн, а также в случае их использования при неоднозначности.

### Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 676 с.
3. Афанасьев И. Полет второго «Кондора» // Новости космонавтики. 2015. № 02(385). С.34-36.
4. Афанасьев И. Зоркий «Кондор» // Новости космонавтики. 2013. №08 (367). С.46-50.
5. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В., Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армандовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.
6. Кондратенков Г.С., Колтышев Е.Е., Фролов А.Ю., Янковский В.Т. Фазовый портрет объектов в РЛС с синтезированной апертурой // Радиотехника. 2000. № 7. С.18-25.
7. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2007. – 544 с.
8. Бабокин М.И. Оценка топографического рельефа местности в РСА при переднебоковом обзоре // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. – С.171-181.
9. Бабокин М.И., Карпов О.А. Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с учётом его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2008. №1. С.148-160.
10. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных

комплексах РСА // Радиотехника. 2009. №7. С.51-58.

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

12. Бабокин М.И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. №10. С.14-17.

13. Бабокин М.И. Авиационный переднебоковой РСА интерферометр для детальной оценки рельефа местности // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2012. №2. С.25-27.

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

Поступила 24 июля 2017 г.

English

### Phase portrait in space SAR radio vision

**Mikhail Ivanovich Babokin** – Doctor of Engineering, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.  
*E-mail:* m.baboki@hotmail.ru.

**Victor Vasilyevich Kostrov** – Doctor of Engineering, Professor, Radio Engineering Department Murom Institute (branch) "Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs".  
*E-mail:* vvk@mit.ru.

*Address:* 602264, Murom, Vladimir Region, Orlovskaya St., 23.

**Evgeny Fedorovich Tolstov** – Doctor of Engineering, Professor, Department Head, CJSC AEROKON.

*E-mail:* E\_tolstov@mail.ru.

*Address:* 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

*Abstract:* The article gives the comparative analysis of phase portrait forming options via SAR (synthetic aperture radars). The classification and definition of phase portrait types are given. Phase portrait benefits are indicated by illustrating amplitude and phase portraits of the same earth area and yet more sophisticated methods are required for these portraits to process and extract data. Phase portraits were formed by different ways: by estimating initial phases (a static phase portrait); by estimating signals' phase difference which are overlapped in time (dynamic phase portrait); by estimating signals' phase difference which are overlapped in spectrum (static phase portrait). Examples of experiment-based phase-difference portraits derived via SAR-equipped Condor-E space-based module are examined. A number of effects is revealed, which enable to get new information on surveillance targets or to carry out their detailed elaboration by SAR. It is shown that the objects differing in height in dynamic phase-difference portrait look more dimensional and detail-elaborated, and ambiguity noise in azimuthal coordinates in such a portrait vanishes. Similar effect is found in moving objects, especially if the objects have large rotating parts (for example, mechanically rotated radar antennas) or if the objects have periodic oscillations (for example, rocking on waves). As a consequence, the conducted research revealed that phase portraiture enables to extend SAR radio vision potential of radiovision in all directions of functioning and shooting modes.

*Key words:* synthetic aperture radar, radio vision, radar image, phase portrait, dynamic portrait, static portrait, azimuth ambiguity.

### References

1. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems of Earth remote sensing. Ed. by G.S. Kondratenkov. – M.: Radiotekhnika, 2005. – 368 p.

2. Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Space-based Earth viewing radar systems. Ed. by V.S. Verba. – M.: Radiotekhnika, 2010. – 676 p.

3. Afanasyev I. Flight of the second "Condor". *Novosti kosmonavtiki*. 2015, No. 2, p. 34 - 36.

4. Afanasyev I. Sharp-sighted "Condor". *Novosti kosmonavtiki*. 2013, No. 08 (367), p. 46-50.

5. Babokin M.I., Yefimov A.V., Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V., Neronskiy L.B., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E. Flight test results and lessons of SAR small-size Condor-E space vehicle. VI All-Russian Armand readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). – Murom: Izdatelsko-poligraficheskoy tsentr MI VIGU, 2016. – P. 16-36.

6. Kondratenkov G.S., Koltyshev E.E., Frolov A.Yu., Yankovsky V.T. The object phase portrait in synthetic aperture radars. *Radiotekhnika*. 2000. No. 7. P. 18-25.

7. Digital signal and image processing in radiophysical applications. – Ed. by Kravchenko V.F. - M.: Fizmalit, 2007. – 544 p.
8. Babokin M.I. Terrain pattern estimation in SAR stripmap mode. - SAR digital signal processing. - Ed. by E.F. Tolstov. - Smolensk, VPVO WA Publishing house of Russian Armed Forces, 2005. – P. 171-181.
9. 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. P. 148-160.
10. Babokin M.I. Relative terrain pattern assessment algorithms in SAR multipoint complexes. - Radiotekhnika. - 2009. No. 7. P. 51-58.
11. Babokin M.I. Status estimation of the confused sea surface via SAR. Radiotekhnika. 2009. No. 11. P. 5-14.
12. Babokin M.I. Measuring accuracy of relative ground surface terrain pattern in SAR multipoint complexes. - Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchiye sistemy. - 2009. No. 10. P.14-17.
13. Babokin M.I. Aircraft stripmap SAR interferometer for detailed terrain pattern estimation. Problems of radio electronics. RLT series. 2012. No. 2. P. 25-27.
14. Babokin M.I., Yefimov A.V., Karpov O.A., Titov M.P. The one-pass interferometer in the stripmap mode. Radiotekhnika. - 2014. No. 7. P. 16-20.