

## Фазовое портретирование в многоканальных РСА

М.И. Бабокин, Е.Ф. Толстов

ЗАО «АЭРОКОМ», 160180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, д. 1, E-mail:  
m.baboki@hotmail.ru, e\_tolstov@mail.ru

*Работа посвящена анализу разностно-фазовых измерений в радиолокаторах с синтезированием апертуры (РСА) с многоканальным приёмом и обработкой сигналов. Обоснована возможность повышения информативности амплитудного радиовидения за счёт фазового портретирования. Приведены результаты экспериментальной обработки сигналов.*

*Work is dedicated to analysis of difference-phase measurements in synthetic aperture radar (SAR) with multi channels reception and signals processing. It is motivated possibility of increasing information of amplitude radio vision at the expense of phase portrait making. The results of the experimental signals processing are presented.*

### Введение

Известно [1, 2], что получаемые в РСА радиолокационные изображения передают характерные особенности местности, объектов, растительного покрова благодаря их различиям в функции отражения. При этом обычно интенсивность каждой точки радиолокационного изображения пропорциональна амплитуде отраженного сигнала соответствующего разрешаемого участка поверхности. Формируется, так называемый амплитудный портрет, то есть, такое радиолокационное изображение, получаемое с высокой пространственной разрешающей способностью, интенсивность каждой точки которого пропорциональна амплитуде отраженного сигнала от соответствующего разрешаемого участка поверхности.

Однако движение объектов, изменение их отражающих свойств во времени и по координатам определяют не только амплитудные различия элементов РЛИ, но и фазовые. Различают статический фазовый портрет и динамический фазовый портрет [1, 2].

Статический фазовый портрет – это радиолокационное изображение, получаемое с высокой пространственной разрешающей способностью, 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, а также пространственных, поляризационных и т.д.). Этот метод позволяет обнаружить изменение отражающих свойств элементов разрешения РСА, например, вследствие их сложной формы, высотного профиля, движения, различных диэлектрических свойств и т.п.

Динамический фазовый портрет – это радиолокационное изображение, получаемое с высокой пространственной разрешающей способностью, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов двух разнесенных во времени (а также в пространстве и времени и т.п.) каналов РСА соответствующего разрешаемого участка поверхности. Динамический фазовый портрет чувствителен к изменению фазы функции отражения во времени. Это изменение может быть обусловлено движением отражающей поверхности объекта, либо изменением свойств из-за высоты, ракурса и т.п.

Современное состояние СВЧ техники и техники синтезирования апертуры таково, что позволяет решать задачу амплитудного радиовидения [1, 2, 3], но фазовое портретирование более эффективно использует информацию, содержащуюся в

пространственно-временной, частотной и поляризационной структуре электромагнитного поля.

Собственно, этой цели – исследованию возможности измерения фазовых проявлений при дистанционном зондировании земной поверхности с помощью высокодетальной многоканальной РСА посвящена представляемая работа.

### Объекты фазового портретирования

Известно [1, 2, 3], что электромагнитная волна (ЭМВ) хорошо рассеивается объектами, геометрические размеры которых сопоставимы с длиной волны. Применительно к растительному покрову, например лесу, сигнал коротковолновых РСА будет, в значительной степени, рассеиваться верхушками деревьев. Сигнал РСА  $S$ -диапазона будет рассеиваться ветками и стволами деревьев, а  $L, P$ -диапазона, в большей степени, отражаться от подстилающей поверхности. Очевидно, что с увеличением длины волны по отношению к размеру отражающего элемента разрешения становятся всё менее интенсивными, и удельная эффективная площадь отражения (УЭПО) довольно быстро спадает. Также УЭПО зависит от поляризации излучения и взаимного направления поляризаций излучаемых и принимаемых ЭМВ. Если плоскость поляризации падающей волны параллельна удлиненным элементам отражающей поверхности (края, кромки, изломы и т.п.) более мощным будет отраженный сигнал с той же поляризацией и минимальным с ортогональной.

Конечно же, УЭПО поверхности или эффективная площадь рассеивания (ЭПР) объекта является определяющим энергетическим параметром, но они не дают фазового представления. Поэтому, в дальнейшем для описания объекта воспользуемся функцией радиолокационного рассеяния (РЛР) [2]  $e_{mn}(x, y)$ , представляемой в виде дискретного матрицы, каждый  $m, n$ -й элемент которой, определяется как среднее на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения  $\delta x, \delta y$  ( $x, y$  – земные координаты,  $x$  направлена вдоль линии визирования,  $y$  – в ортогональном направлении). Модуль каждого элемента РЛР пропорционален корню квадратному из УЭПО поверхности и пространственной разрешающей способности или ЭПР объекта, а фаза определяется не только свойствами объекта, но и условиями полёта, наблюдения и параметрами многоканальной РСА. При описании дискретной функции РЛР используются координаты фазового центра переотражения  $(x, y)$ , в пределах  $m, n$ -го элемента разрешения. Для изотропной поверхности:  $(x=0, y=0)$ , но как только на поверхности появляется уклон, обрыв, контрастный, движущийся объект и т.п., внутри элемента разрешения происходит смещение фазового центра переотражения и тогда его положение внутри элемента разрешения может оказаться определяющим при фазовых измерениях.

В современной радиолокации, каждый объект должен быть описан так называемой поляризационной матрицей рассеяния (ПМР) [1, 2, 3]:

$$\mathbf{e}(x, y) = \begin{pmatrix} e_{mn}^{\sigma\sigma}(x, y) & e_{mn}^{\sigma\phi}(x, y) \\ e_{mn}^{\phi\sigma}(x, y) & e_{mn}^{\phi\phi}(x, y) \end{pmatrix}.$$

Здесь индексы “ $\sigma$ ” и “ $\phi$ ” указывают на принадлежность к горизонтальной и вертикальной поляризации. Итак, земная поверхность для каждого поляризационного состояния, представляется матрицей радиолокационного рассеяния, каждый элемент которой определяется своим модулем  $|e_{mn}^{\sigma\sigma}(x, y)|$ , фазой  $\varphi_{mn}^0 = \arg\{e_{mn}^{\sigma\sigma}(x, y)\}$  и положением фазового центра переотражения внутри элемента разрешения  $(x, y)$ .

Задача состоит в получении оценки этих параметров или их отклонений для каждого элемента РЛР в каждом поляризационном состоянии. Расширяется спектр решаемых задач, повышается помехозащищённость, точность оценивания, если в комплексе дистанционного зондирования возрастает степень многоканальности за счёт использования нескольких РСА или разнесённых приёмников, использующих многочастотный анализ. При этом в описании многоканального процесса наблюдения за земной поверхностью участвует не одна матрица РЛР, а несколько, в зависимости от частот излучения и приёма, пространственных позиций и пространственно-временных сеансов [1, 2].

### Относительное фазовое портретирование

Основой РСА фазового портретирования является поэлементное или групповое выделение фазовых различий приведённых к одному масштабу парных сигналов: пространственных, пространственно-временных, частотных, поляризационных и т.п. Для решения задач фазового портретирования необходимо найти матрицу:

$$\Phi(x, y) = \arg \{ \hat{\mathbf{e}}(x, y)^* \hat{\mathbf{e}}(x, y)^T \}.$$

Эта матрица позволяет ставить задачу детального анализа фазовых отклонений и классификации поверхностей и объектов. На разных частотах ЭМВ, при разных ракурсах наблюдения, сеансах и поляризациях, вид и значения матрицы имеет свою специфику. В случае многопозиционного и (или) многочастотного комплекса РСА присутствуют минимум два источника, тогда матрица фазового портретирования преобразуется к виду:

$$\Phi_{12}(x, y) = \arg \{ \hat{\mathbf{e}}_1(x, y)^* \hat{\mathbf{e}}_2(x, y)^T \},$$

Эта матрица несет информацию не только о свойствах объекта, но о его пространственных, частотных и пространственно-временных изменениях через относительные фазовые отклонения комплексной функции РЛР. Рассмотрим подробнее специфику формирования траекторного сигнала РСА при наблюдении за сложными объектами на земной поверхности.

### Земная поверхность с возвышением

На рис.1 представлена геометрическая схема наблюдения с помощью РСА за земной поверхностью с уклоном, то есть плавным возвышением. Носитель РСА движется со скоростью  $V$  на высоте  $H$ . Наблюдение за участком земной поверхности на дальности  $R_0$  осуществляется при телескопическом обзоре [1, 2] некоторое время  $t = -T_c/2 \dots T_c/2$ ,  $T_c$  – время синтезирования. По азимуту луч отклонён на угол  $\alpha_0$ .

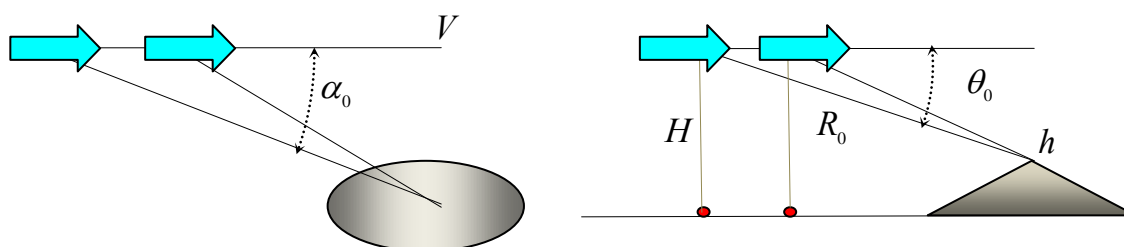


Рис. 1. Схема наблюдения за земной поверхностью с возвышением

Местный рельеф влияет на расстояние до объекта исследования (в данном случае изотропной земной поверхности):

$$r(t, h) \approx R_0 - V \sin(\alpha_0)t - h \cos(\alpha_0)\cos(\theta_0) + \frac{(V \cos(\alpha_0)t)^2}{2R_0} + h \frac{\sin(2\alpha_0)\cos(\theta_0)Vt}{2R_0} + h \frac{\cos(\alpha_0)\cos(\theta_0)(Vt)^2}{R_0^2} + x \sin(\theta_0) + \frac{\lambda}{2} \frac{y}{\delta y T_c} t,$$

причём уклон поверхности  $\mu_y$  (вдоль линии визирования) влияет на размер элемента разрешения по земной дальности:  $\delta x \approx \delta r / \sin(\theta_0 - \mu_y)$ , на отклонение фазового центра

переотражения:  $x \approx \mu_y \operatorname{ctg}(\theta_0) \frac{\delta r}{2 \sin(\theta_0 - \mu_y)}$ , а  $\mu_x$  (вдоль линии, ортогональной линии

визирования) влияет на размер элемента разрешения по земной дальности:  $\delta y' \approx \delta y / \cos(\mu_x)$  и отклонение фазового центра переотражения:

$$x \approx \mu_x \cos(\theta_0) \frac{\delta y'}{2}, y \approx \mu_x^2 \frac{\delta y}{4}.$$

Эти соотношения показывает, что возвышение поверхности отражается не только на дальности (изменяет начальную фазу, доплеровскую частоту), на разрешении (изменяет уровень сигнала, положение на изображении), а также смещает фазовый центр переотражения. В результате РСА обработки [1,2] для одного поляризационного состояния (без учёта дополнительных потерь при распространении и обработке) получаем следующую оценку элемента матрицы РЛР:

$$\hat{e}_{mn}^{zz}(x, y) = \left| e_{mn}^{zz}(x, y) \right| \exp \left\{ j \left( \varphi_{mn}^0 \right) \right\} \times \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi}{\lambda} \left( x \sin(\theta_0) + \frac{\lambda}{2} \frac{y}{\delta y} - h \left( \cos(\alpha_0)\cos(\theta_0) - \frac{\sin(2\alpha_0)\cos(\theta_0)V T_c}{4R_0} \right) \right) \right) \right\}.$$

Отметим отдельно начальную фазу переотражения  $\varphi_{mn}^0$ , которая является случайной величиной с распределением и характеристиками, соответствующими определённым объектам на поверхности. Это случайное фазовое отклонение является основным препятствием для проведения детального фазового анализа. Возможным выходом из положения является получение минимум пары оценок с одинаковым (почти одинаковым) значением  $\varphi_{mn}^0$ . После операции комплексного сопряжения, когда фазы вычитаются, начальная фаза переотражения «исчезает». По фазовому остатку можно проводить исследование фазового отклонения, специфическим образом характеризующие объект.

Парное оценивание с последующей компенсацией  $\varphi_{mn}^0$  возможно тремя известными способами [1–7]:

Изменение ракурса наблюдения  $\theta_0, \theta_0 + \Delta\theta$  или  $\alpha_0, \alpha_0 + \Delta\alpha$ . Реализация возможна при использовании пары носителей РСА, работающих в бистатическом режиме с пространственным смещением или следующих один за другим.

В этом случае можем записать (для бокового обзора):

$$e1_{mn}^{zz}(x, y)e2_{mn}^{zz}(x, y)^* \approx \left| e1_{mn}^{zz}(x, y) \right|^2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\theta (x \cos(\theta_0) - h \sin(\theta_0)) \right) \right\}. \quad (1)$$

Для скошенного обзора:

$$e1_{mn}^{zz}(x, y)e2_{mn}^{zz}(x, y)^* \approx \left| e1_{mn}^{zz}(x, y) \right|^2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi}{\lambda} (-h \sin(\alpha_0)\Delta\alpha \cos(\theta_0)) \right) \right\}. \quad (2)$$

где  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\alpha$  – угловые смещения между позициями или подрешётками.

Изменение длины волны  $\lambda_1 = c / f_1$ ,  $\lambda_2 = c / f_2$ , с тем условием, чтобы смещение по частоте было значительно меньше полосы зондирующего сигнала. Можно использовать череспериодное зондирование, а можно «вырезать» смещённые спектральные составляющие из одного принятого сигнала с некоторой потерей разрешения [4, 5]:

$$e1_{mn}^{2z}(x, y)e2_{mn}^{2z}(x, y)^* = \left| e1_{mn}^{2z}(x, y) \right|^2 \times \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi(f_1 - f_2)}{c} \left( x \sin(\theta_0) + \frac{\lambda}{2} \frac{y}{\delta y} - h \cos(\theta_0) \left( \cos(\alpha_0) + \frac{\sin(2\alpha_0) \mathcal{V} T_0}{4R_0} \right) \right) \right) \right\}. \quad (3)$$

При боковом обзоре или без временных сеансов:

$$e1_{mn}^{2z}(x, y)e2_{mn}^{2z}(x, y)^* = \left| e1_{mn}^{2z}(x, y) \right|^2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi(f_1 - f_2)}{c} (x \sin(\theta_0) - h \cos(\theta_0)) \right) \right\}.$$

Временные изменения. Если провести два измерения подряд, со смещением по времени следующего сеанса в доли всего интервала синтеза  $T_0 = T_c / (4...8)$ , получим парные оценки с практически неизменной фазой переотражения:

$$e1_{mn}^{2z}(x, y)e2_{mn}^{2z}(x, y)^* \approx \left| e1_{mn}^{2z}(x, y) \right|^2 \exp \left\{ j \left( \frac{4\pi}{\lambda} \left( -h \frac{\sin(2\alpha_0) \cos(\theta_0) \mathcal{V} T_0}{2R_0} + \frac{\lambda}{2} \frac{y T_0}{\delta y T_c} \right) \right) \right\}. \quad (4)$$

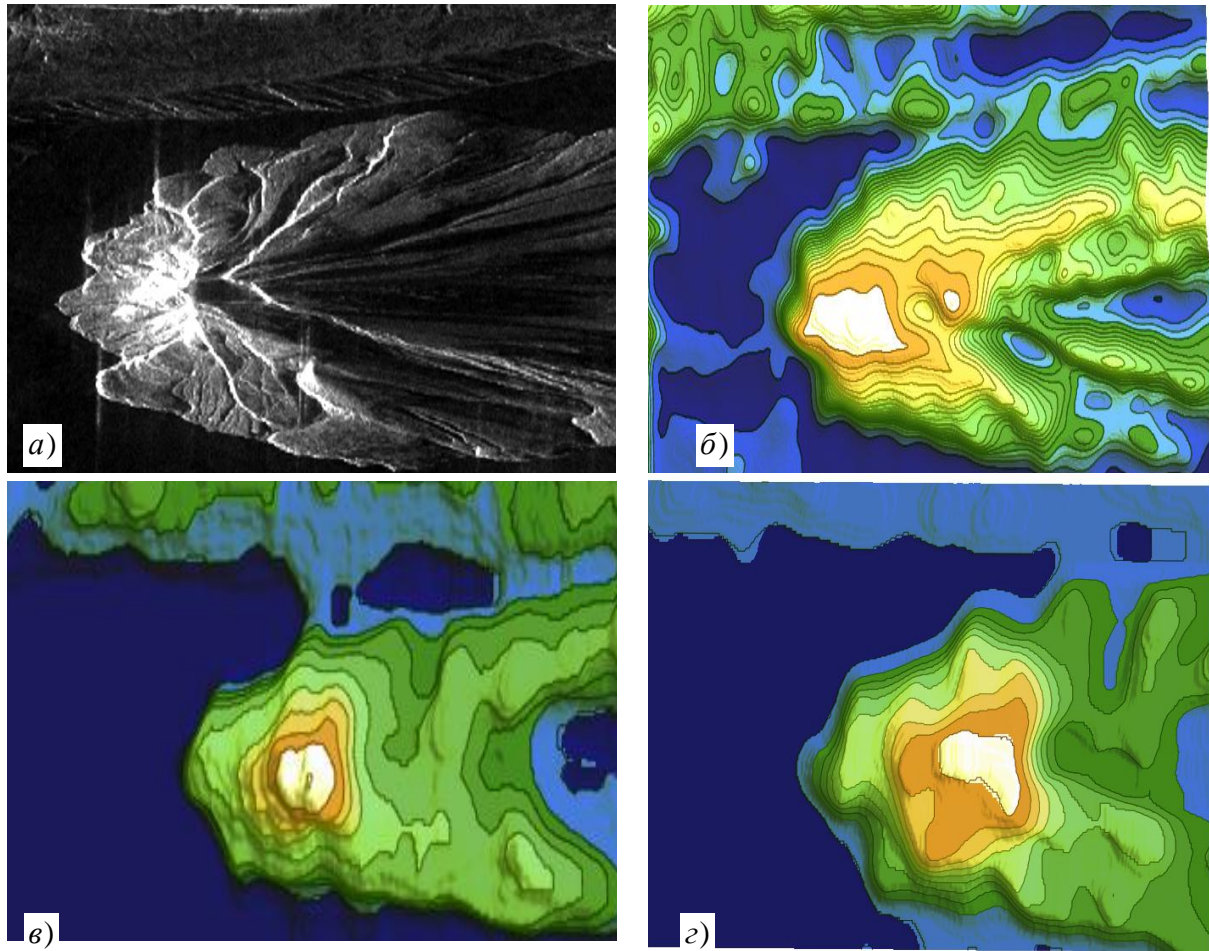
Фактически выражения (1) – (4) описывают базовую операцию возможных вариантов интерферометрических измерителей относительного рельефа земной поверхности. У каждого из этих интерферометров свои потенциальные возможности, способы реализации, но все они схожи в том, что если найти аргумент после компенсации начальной фазы, можно с определённой точностью восстановить местный рельеф. Отметим, что во всех вариантах, кроме (2) присутствуют помехи, зависящие от смещения фазового центра переотражения.

В случае возвышения с уклонами можно определить это смещение следующим образом:

$$x \approx \mu_x \cos(\theta_0) \frac{\delta y'}{2} + \mu_y \operatorname{ctg}(\theta_0) \frac{\delta r}{2 \sin(\theta_0 - \mu_y)}, \quad y \approx \mu_x^2 \frac{\delta y}{4}.$$

На рис.2а представлено РЛИ остывшего вулкана на водной поверхности, сформированное при отклонении диаграммы направленности вперёд примерно на её ширину, что составляет около  $1^\circ$ . Результаты получены в результате обработки сигналов РЛК «Кондор-Э». На основе этой съёмки был реализован вариант однопроходной интерферометрической оценки рельефа местности (вариант 4) с контурами одинаковых высот, результаты которой показаны на рис.2б. На рис.2в представлена «очищенная» от уклонов оценка рельефа местности. При перепадах высот до 1300 м (пик вулкана посередине озера) и размерах 500...700 м, на отдельных участках уклоны превосходили допустимый предел и вносили значительные искажения. Измерение и фильтрация уклонов значительно повысили достоверность интерферометрических измерений.

На рис.2г представлена «очищенная» от уклонов оценка рельефа того же вулкана, где был реализован вариант разночастотной (вариант 3) интерферометрической съёмки с крутизной в 2...2.5 раза ниже предыдущей. Очевидно, в этом случае влияние уклонов значительно весомее.



**Рис. 2. Оценка рельефа местности при переднебоковом и разночастотном обзоре**

Анализ фазовых отклонений позволил повысить точность измерения местного рельефа в сложных условиях, не решая задачи фазового портретирования, хотя карта уклонов (вырезанная часть) сама по себе имеет информационную ценность в качестве приведённого фазового представления.

### **Контрастные объекты на поверхности**

Относительные фазовые отклонения особым образом проявляются на контрастных объектах искусственного и естественного происхождения: берег, обрыв, мост, вышка, дом и т.п. Контраст может быть как высотный, так и амплитудный. В качестве показательного примера рассмотрим точечный объект (ТО) без возвышения над поверхностью, размеры которого много меньше элемента разрешения. ЭПР объекта значительно превосходит отражения от поверхности, приходящиеся на элемент разрешения РСА. Если объект будет находиться в центре элемента разрешения, то ни в одной схеме интерферометра в соответствии с 1)....4), фазового отклонения не будет, но следует только ему сместиться по дальности или азимуту, произойдёт фазовый скачок, причём в каждом интерферометрическом измерителе разный.

Так в соответствии с выражением 1) при отклонении ТО на край элемента разрешения по дальности скачок фазы может достигать величины:

$$\Delta\varphi_1 \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\delta x}{2} \cos(\theta_0) \frac{B}{R_0} \approx 60...100^0, \text{ при } \delta x \approx 2...3\text{м}, \lambda \approx 9\text{см}, R_0 \approx 600\text{км}, B \approx 6\text{км}.$$

Смещение по азимуту на половину элемента разрешения  $\delta y \approx 2...3\text{м}$  существенно «отзывается» в четвёртой схеме (скачѣк определяется в соответствии с выражением 4)):

$$\Delta\varphi_4 \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{2} \frac{yT_0}{\delta y T_c} \approx 30...60^\circ.$$

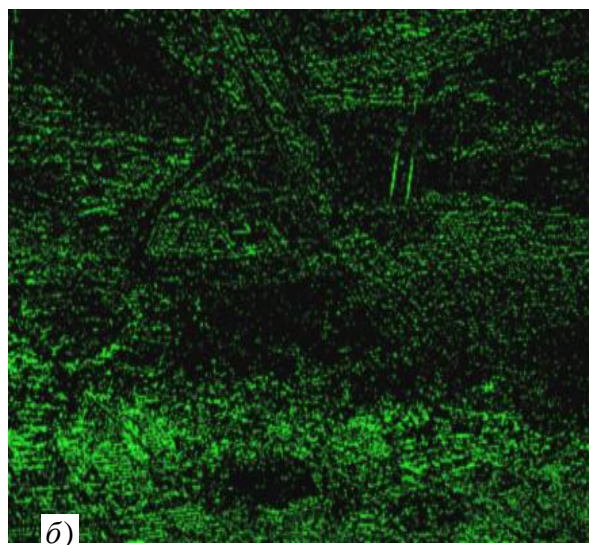
По третьей схемы скачки достигают максимальных значений, даже при боковом обзоре и разности частот  $(f_1 - f_2) \approx 50 \text{ МГц}$ :

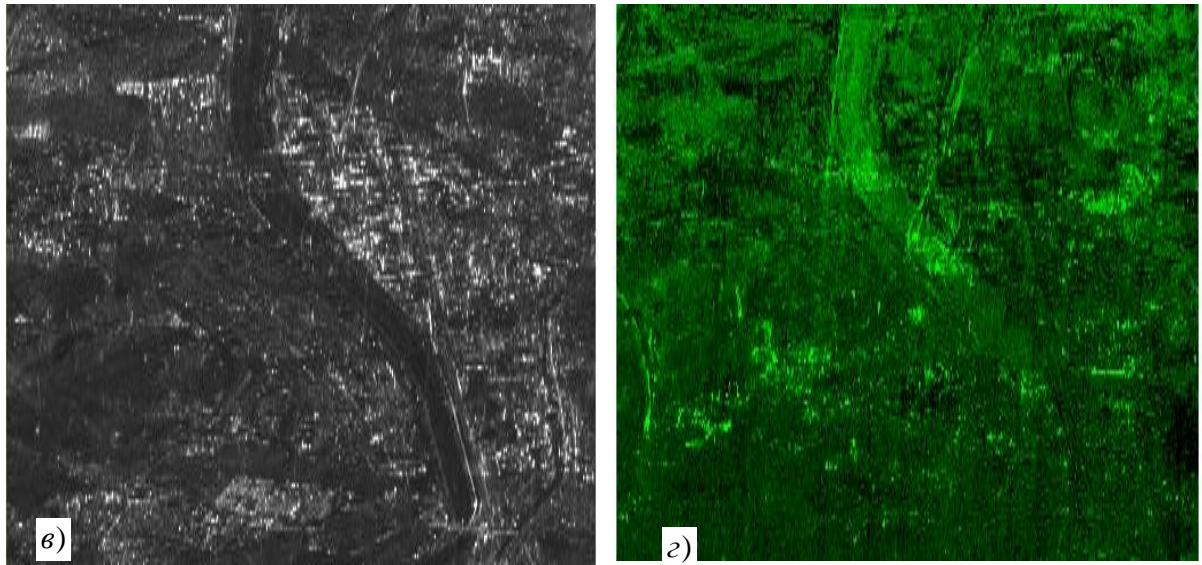
$$\Delta\varphi_3 \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{(f_1 - f_2)}{c} \frac{\delta x \sin(\theta_0)}{2} \approx 100...120^\circ.$$

В соответствии с избранной моделью дискретной функции РЛР и согласованной обработкой, измерения следуют через величину разрешающей способности, как по дальности, так и по азимуту, а это значит, что смещение на половину элемента разрешения точечного отражателя (ТО), приводит к скачку фазы в соседних фильтрах или каналах дальности, причѣм противоположного знака. То есть, только за сѣт смещения фазового центра сигнала внутри элемента разрешения могут происходить значительные фазовые отклонения с определённым изменением величины и знака. Если же объект контрастный, но не точечный скачѣк фазы возможен только по краям объекта: по дальности для первой третьей схемы и по азимуту для четвёртой (возможно и для третьей схемы при многосеансной организации и скошенном обзоре). Знак этого скачка будет определяться положением края объекта внутри элемента разрешения.

Не стоит забывать о высотной контрастности, например, вышки, дома и т.п. Высотный контраст сопровождается знакопеременным скачком фазы по краю объекта, поскольку обычно эта граница сопровождается амплитудным скачком (условие обратного отражения). Направление этого фазового контура буде определяться схемой построения интерферометра: минимальное проявление по азимуту для первой схемы и по дальности для четвёртой. Хотя все эти фазовые проявления носят вероятностный характер, но при достаточной пространственной статистике могут дополнить описание свойств объекта и повысить информационные возможности РСА.

На рис.3 представлены результаты обработки сигналов для иллюстрации фазового портретирования по контрастным объектам.





**Рис. 3. Амплитудные и статические фазовые портреты г.Сеул**

На первом фазовом портрете (рис.3б) более явно, чем на амплитудном портрете (рис.3а), выделяются возвышающиеся строения, контрастные естественные и искусственные объекты. Фазовый портрет и РЛИ, сформированы при скошенном обзоре  $\alpha_0 \approx 1^\circ$  по схеме (4).

Во втором фазовом портрете (рис.3в) более явно, чем на амплитудном портрете (рис.3г), выделяются вышки, высотные здания, мосты. Фазовый портрет и РЛИ сформированы при скошенном обзоре  $\alpha_0 \approx 1^\circ$  по третьей схеме разночастотным методом, поэтому особенно выделяются объекты с контрастным градиентом по дальности.

### **Движущиеся объекты и движение на поверхности**

Значительный сектор в исследованиях фазовых отклонений занимают движущиеся объекты и движение на поверхности. Рассмотрим первый случай и предположим, что по земной поверхности движется точечный объект со скоростью:  $v_o = [v_{op}; v_{om}]$ , где  $v_{op}$  – радиальная (вдоль линии визирования) скорость движения,  $v_{om}$  – тангенциальная (в направлении, ортогональном линии визирования). Тогда, дальность от ФЦА носителя до этого объекта будет изменяться следующим образом:

$$r(t, v_o) \approx R_0 - V \sin(\alpha_0)t + \frac{(V \cos(\alpha_0))^2 t^2}{2R_0} + \frac{V v_{om} \cos(\alpha_0) t^2}{R_0} - \sin(\theta_0) v_{op} t .$$

По первой схеме построения РСА интерферометра получим фазовое отклонение:

$$\Delta\varphi_{1\theta} \approx \frac{2\pi T_c}{\lambda} \cos(\theta_0) \Delta\theta v_{op} ,$$

где  $\Delta\theta$  – угловое смещение между ФЦА двух подрешёток или двумя позициями по углу места,

$$\Delta\varphi_{2\alpha} \approx \frac{2\pi T_c}{\lambda} \left( \frac{V}{R_0} \sin(\alpha_0) \Delta\alpha v_{om} \frac{T_c}{2} - \frac{\Delta\alpha^2}{2} \sin(\theta_0) v_{op} \right) ,$$

где  $\Delta\alpha$  – угловое смещение между ФЦА двух подрешёток или двумя позициями по азимуту.



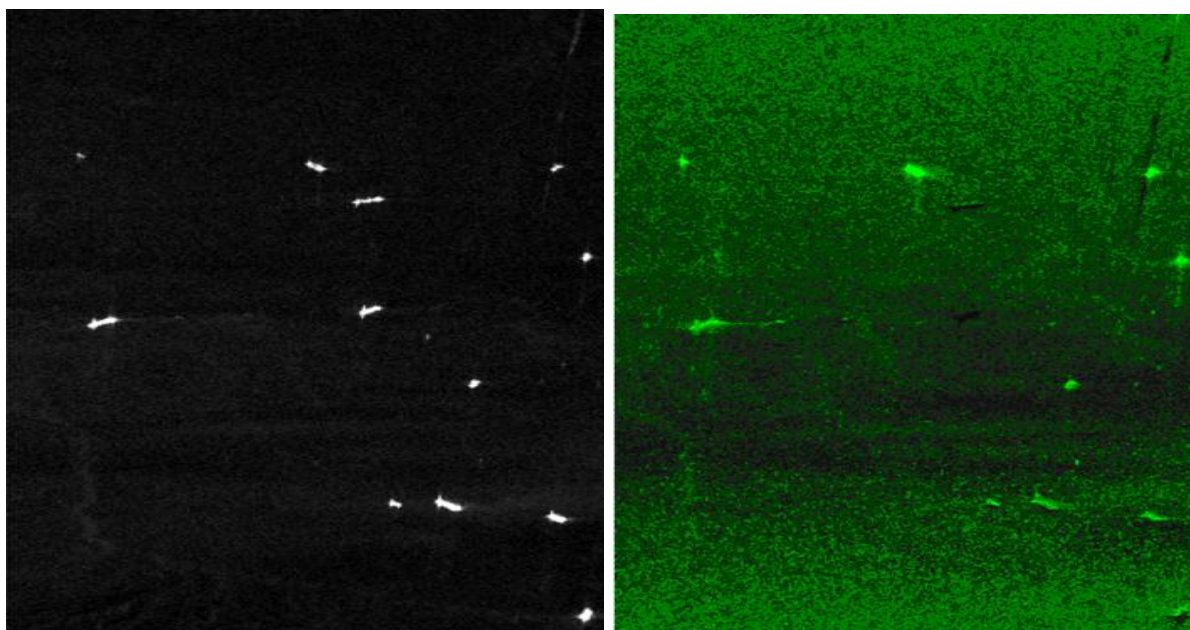
Третий вариант построения отличается следующим фазовым отклонением:

$$\Delta\varphi_{3f} \approx \frac{2\pi\Delta f}{c} T_c \left[ \sin(\theta_0)v_{op} + \frac{Vv_{om} \cos(\alpha_0)T_c}{R_0} \right], \Delta f \approx \frac{\Delta f_{сигн}}{4...16}.$$

Также не следует забывать о временном интерферометре:

$$\Delta\varphi_{4t} \approx \frac{2\pi T_0}{\lambda} \left[ \sin(\theta_0)v_{op} + \frac{Vv_{om} \cos(\alpha_0)T_c}{R_0} \right], T_0 \approx \frac{T_c}{4...16}.$$

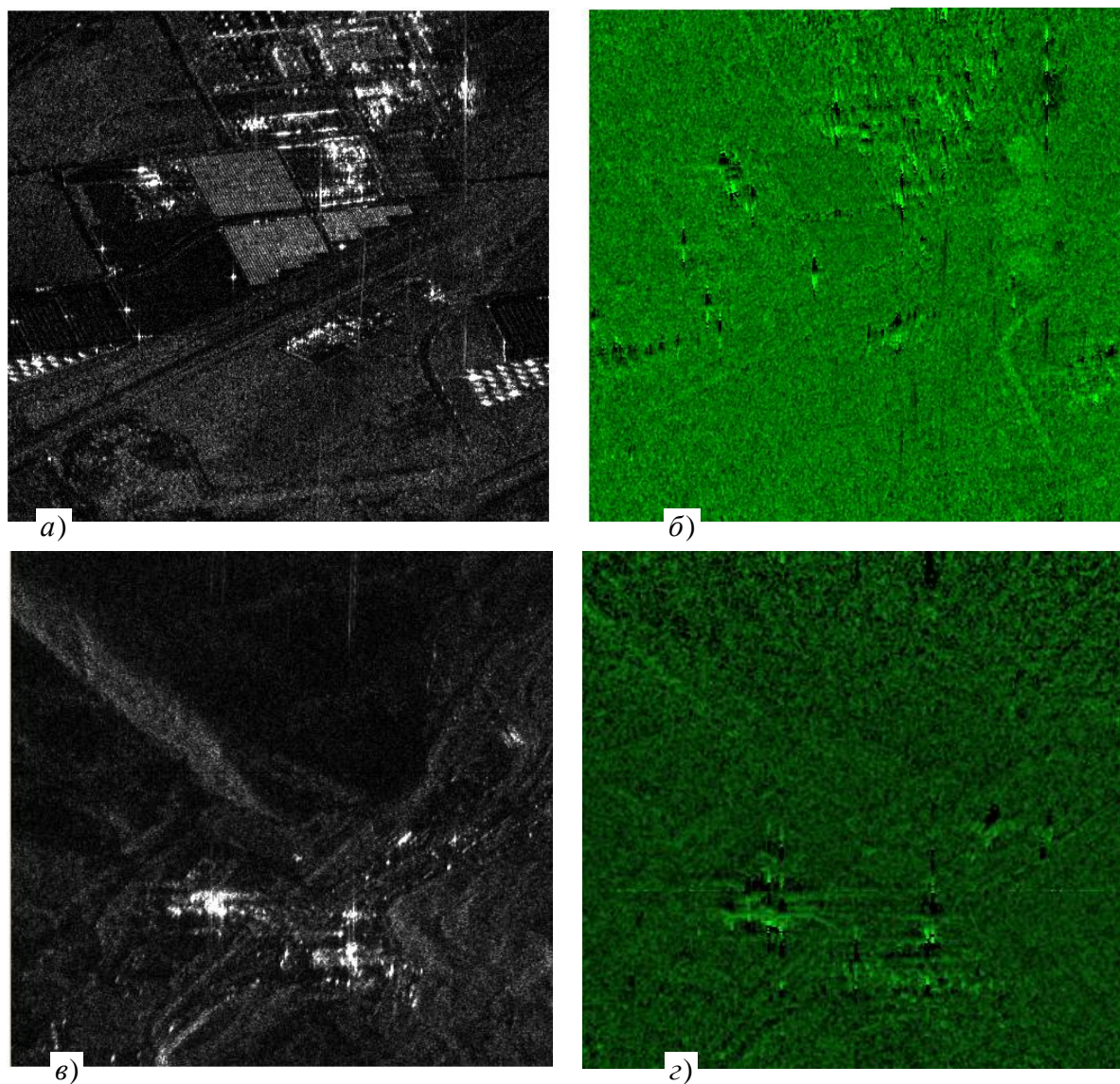
Причём, в любом из вариантов построения интерферометра это фазовое отклонение будет средним значением, вокруг которого будет относительное знакопеременное изменение из-за движения ТО. Минимальное отклонение будет по второй и четвёртой схеме построения интерферометра. Это явление отчётливо проявляется на РЛИ и фазовом портрете морской поверхности и с активным движением объектов (рис.4). Парные сигналы формируются в смежных сеансах наблюдения с относительным смещением в доли интервала синтезирования (четвёртая схема). Чтобы минимизировать влияние фазовых отклонений высотного характера, исследование фазовых проявлений движущегося объекта целесообразно проводить при боковом обзоре. В данном случае «яркость» пропорциональна скорости и направлению движения объекта. Из анализа представленных данных можно сделать вывод, что одна часть кораблей движется «налево» (максимальная яркость), другая часть с минимальной яркостью «направо», и есть группа неподвижных объектов в нижней части изображения.



**Рис. 4. Амплитудный и динамический фазовый портреты морских судов**

Отдельно стоит остановиться на способе движения, достойного фазового анализа. Таковым является поступательное механическое вращение, которым обладают «приводные» и обзорные РЛС, вертолёты и т.п. При этом происходит гармоническое или периодическое изменение радиальной скорости и амплитуды отражённого сигнала, причём периодов вращения может быть несколько на интервале синтезирования. Это специфически влияет на фазовую структуру отражённого сигнала и может быть основанием для обнаружения и идентификации объектов.

На рис.5 представлены две пары РЛИ и соответствующего фазового портрета района аэропорта (рис. 5а,б) и космодрома (рис. 5в,г). В первом случае, кроме замечательных ТО объектов высотного контраста (скорее всего вышки), в правом верхнем углу можно отчётливо наблюдать фазо-азимутальное проявление кругового вращения в виде знакопеременной модуляции. На амплитудном портрете это явление в виде «растяжек» по азимуту. Фазовый портрет и РЛИ сформированы при скошенном обзоре по четвёртой схеме построения интерферометра.



**Рис. 5. Амплитудный и фазовый района аэродрома и космодрома**

На второй паре рис.5в,г сравнительный анализ показывает, что, кроме фазового проявления рельефа «стартового стола и вышек», по азимуту видим всё те же фазовые знакопеременные проявления кругового вращения. Причём, можно отметить две пары таких отклонений, смещённых до дальности. Фаза вращения у этих фазовых «гирлянд» разная, но период, а значит скорость вращения, приблизительно одинаковая.

Итак, в статье теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность измерения фазовых отклонений сигналов от объектов сложной формы, структуры, рельефа, в статическом и динамическом состоянии при дистанционном зондировании земной поверхности с помощью высокодетальной многоканальной РСА. Это

значительно обогащает информативность амплитудного подхода и обосновывает актуальность использования фазового портретирования.

### Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.
2. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2007.
3. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010.
4. 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 РФ, 2005.
5. Бабокин М.И., Карпов О.А. Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с учетом его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2008. №1.
6. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА // Радиотехника. 2009. №7.
7. Бабокин М.И. Оценка состояния взволнованной морской поверхности с помощью РСА // Радиотехника. 2009. №11.
8. Бабокин М.И. Авиационный переднебоковой РСА интерферометр для детальной оценки рельефа местности // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2012. №2.
9. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7.