

## **Использование космического однопроходного РСА интерферометра для подповерхностного фазового мониторинга**

М.И. Бабокин<sup>1</sup>, А.В. Ефимов<sup>1</sup>, С.Э. Зайцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЗАО «АЭРОКООН», г. Жуковский, МО, ул. Гагарина, 1, e-mail: m.baboki@hotmail.ru,

<sup>2</sup> АО «ВПК «НПО Машиностроения», г. Реутов, МО, ул. Гагарина, 33, e-mail: zaisergeri@mail.ru

*Представлены основные положения организации космического переднебокового интерферометра для подповерхностного фазового мониторинга. Приведены результаты экспериментальной обработки сигналов.*

*Basic provisions of the organization are presented space forward side interferometer for subsurface phase monitoring. Results of experimental processing of signals are given.*

### **Введение**

Интерферометрические измерения в радарных технологиях позволяют решать сложнейшие задачи, такие как получение высокоточных цифровых моделей рельефа, мониторинг приграничных территорий, нестабильных склонов, отслеживание изменений на объекте и др. [1–9].

Вместе с тем, детальный анализ широкого спектра пользовательских задач дистанционного зондирования Земли подсказывает, что весьма актуальным становится подповерхностный мониторинг верхнего покрова почвы [1–3,10].

Из ряда перспективных направлений радиолокационного мониторинга можно отметить интерферометрические фазоразностные методы [1,4,9]. Среди вариантов построения интерферометрических комплексов своей простотой, гибкостью и достаточно высокими техническими характеристиками выделяется однопроходный интерферометр при переднебоковом или скошенном обзоре земной поверхности [4–8].

**Цель работы** можно определить следующим образом: обоснование возможности фазового мониторинга верхнего покрова земной поверхности с использованием техники однопроходной радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА) интерферометрии при скошенном обзоре. Разработка алгоритмов интерферометрической обработки многоканальных радиоголограмм с последующим подтверждением их работоспособности по реальным сигналам.

### **Специфика подповерхностного мониторинга**

Известно [1,2,4,10] о проблеме подповерхностного зондирования короткими электромагнитными волнами (ЭМВ), которые, при всех своих преимуществах, имеют весьма ограниченную проникающую способность в почвы, особенно покрытые растительностью, в водную среду и т.д. Глубокому проникновению ЭМВ этих диапазонов препятствует также относительно высокое содержание влаги и соответствующая этому их высокая электропроводность. Если даже зондирующий сигнал проникает в сухую почву, то в области его проникновения происходит рассеяние на диэлектрических неоднородностях земной поверхности. Глубина проникновения зависит, как от соотношения между длиной волны ЭМВ и неровностями земной поверхности, так от значения комплексной диэлектрической постоянной.

В большинстве случаев с достаточной для оценочных данных точностью глубина проникновения ЭМВ в однородную по составу среду может быть оценена по приближённой формуле [3,4,11] ( $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \ll 1$ ):

$$\delta_3 \approx \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\varepsilon''},$$

где  $\delta_3$  – расстояние от границы раздела сред, где величина мощности ЭМВ на 4.34 дБ меньше мощности падающей волны в точке, расположенной непосредственно под поверхностью,

$\lambda \approx 3...9$  см – длина ЭМВ в свободном пространстве,

$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$  – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

В [11] представлены значения составляющих диэлектрической проницаемости некоторых сред, по которым можно рассчитать глубину проникновения. Так, для кварцевого песка глубина проникновения:  $\delta_3 \approx 2,5$  м и  $\delta_3 \approx 7,5$  м, соответственно для:  $\lambda = 3$  см и  $\lambda = 9$  см. Гранит имеет расчётную глубину:  $\delta_3 \approx 0,2$  м и  $\delta_3 \approx 0,6$  м, а для «сухой» глины:  $\delta_3 \approx 8$  см,  $\delta_3 \approx 24$  см.

Можно сказать, что в некоторые среды при определённых условиях проникновение таких ЭМВ достаточно значительное. Другое дело, насколько земной покров или объекты на поверхности «позволят» проникнуть ЭМВ под поверхность. Вместе с тем, предварительные данные позволяют надеяться на положительный результат исследования.

Конечно, дополнительный интерес представляет сигнал, преодолевающий границу сред и распространяющийся далее. Само по себе проникновение в следующий слой может повторяться много раз. Однако, имея в виду ограниченный потенциал РЛС, есть смысл рассматривать отражённые сигналы после проникновения через одну границу [4,10].

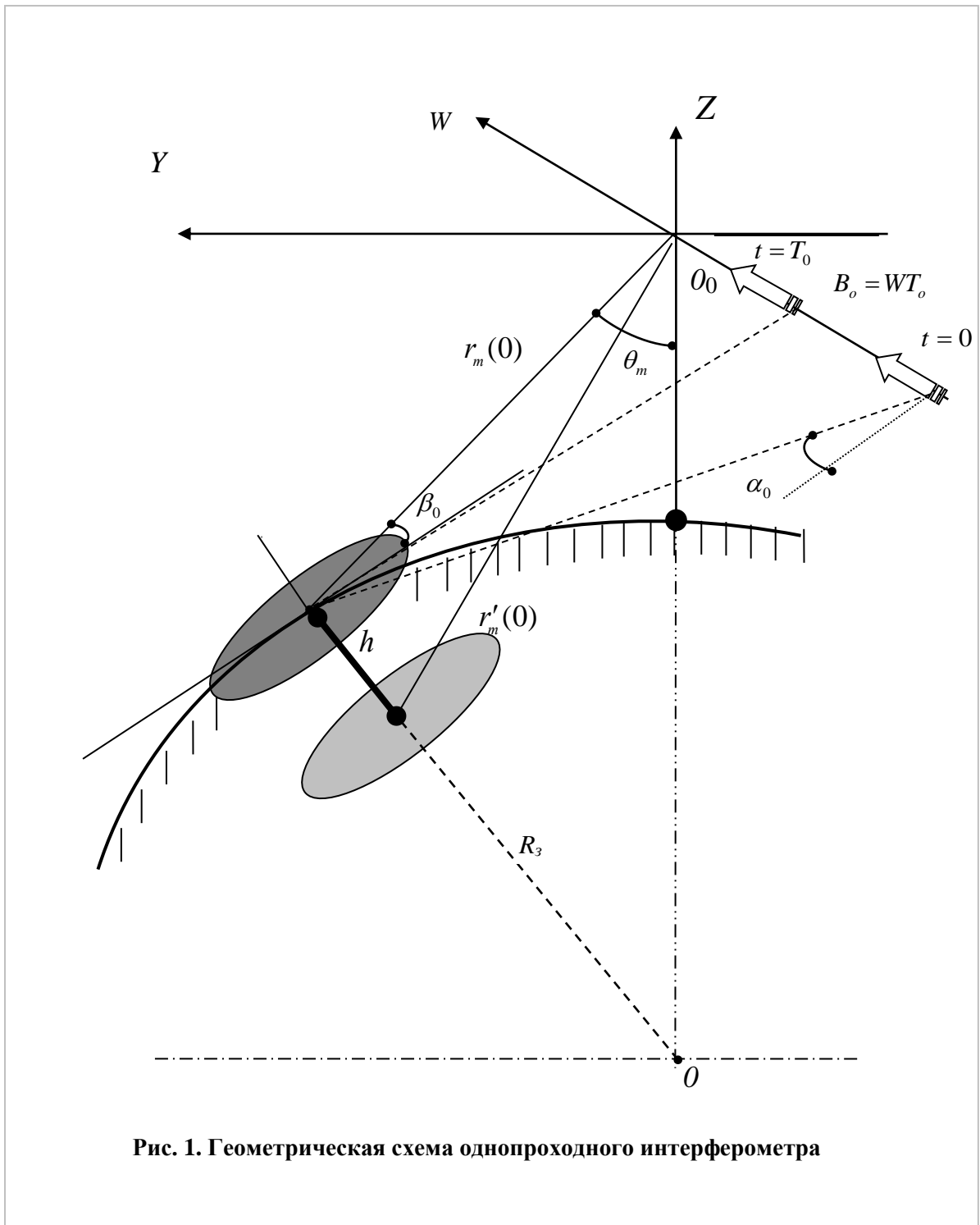
В упрощённом, но обоснованном варианте рассмотрения, будем считать, что до антенны РЛС «доходит» аддитивная смесь сигнала, отраженного от земной поверхности  $s_1(t)$  и подповерхностного слоя, расположенного на определённой глубине  $h$  и с определёнными потерями:  $s_2(t, h)$ . Будем считать также, что при проникновении и отражении ЭМВ от заглублённого объекта исследования поляризационных отклонений не происходит.

### **Геометрические соотношения скошенного интерферометра**

Рассмотрим схему однопроходного интерферометра РСА (рис. 1), когда пространственное разнесение для проведения интерферометрических измерений обеспечивается за счет естественного перемещения одного космического аппарата (КА).

В дальнейших рассуждениях используем прямоугольную подвижную путевую систему координат (ПСК)  $O_0XYZ$ , расположенную в ЦМ КА, ориентированную таким образом, чтобы вектор относительной скорости КА, с учетом вращения Земли, в данной точке орбиты  $W$  в начальный момент времени  $t = 0$  находился в плоскости  $XO_0Z$ . Наблюдение производится некоторое время (несколько секунд), в общем случае превышающее время синтеза РСА.

При ориентации в ПСК, продольная ось по мере движения КА в течение витка поворачивается параллельно следу КА.



**Рис. 1. Геометрическая схема однопроходного интерферометра**

Для малых интервалов времени с учётом плавности траектории и ориентации оси  $O_0X$  вдоль вектора  $W$  КА можем записать, что

$$\left. \begin{aligned} x_{цм}(t) &\approx Wt \\ y_{цм}(t) &\approx \frac{1}{2}a_{y0}t^2 \\ z_{цм}(t) &\approx H_0 + \frac{1}{2}a_{z0}t^2 \end{aligned} \right\},$$

где  $a_{y0} = 0 \dots (\pm 2W\Omega_3)$  и  $a_{z0} = -(W^2 / R_{KA})$  – значения линейных ускорений ЦМ КА вдоль осей  $O_0Y$  и  $O_0Z$ ,

$H_0$  – высота орбиты над поверхностью Земли в начальный момент времени,

$R_{KA}$  – радиус орбиты космического аппарата (КА),

$\Omega_3 \approx 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$  – угловая скорость вращения Земли.

Очевидно, что значения коэффициентов  $H_0, W, a_{y0}, a_{z0}$  будут существенно зависеть от географических координат точки наблюдения (т.е. начала системы координат  $O_0XYZ$ ) на поверхности Земли, а также радиуса  $R_0$  и угла наклона орбиты  $\gamma_0$  (т.е. угла между плоскостью экватора и плоскостью орбиты КА).

Геометрическая схема на рис. 1 представляет радиолокационное наблюдение в ПСК для большой дальности и небольшой ширины зоны обзора при "скошенном" обзоре. Через определенный интервал  $B_0 = \Delta X = WT_0$  (доли интервала синтезирования) сеанс картографирования определенного участка возобновляется. Во втором сеансе наблюдения значения углов  $\beta_0, \theta_m$  практически не изменяются. Индекс  $m$  означает номер полосы дальности размером в разрешающую способность.

В первом сеансе наблюдения текущее расстояние от фазового центра антенны (ФЦА) до определенной точки исследуемого участка ровной земной поверхности определяется следующим образом:

$$r_m(t) \approx r_m(0) + v_{rm}t + a_{rm} \frac{t^2}{2},$$

$$\text{где } r_m(0) = R_3 \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin\theta_m}, \quad v_{rm} \approx W \sin(\alpha_0) \sin(\theta_m + \beta_0),$$

$$a_{rm} \approx (-\sin(\theta_m + \beta_0)a_{y0} + \cos(\theta_m + \beta_0)a_{z0}) \cos(\alpha_0) + \frac{W^2 \cos(\alpha_0)^2}{r_m(0)}.$$

Для подповерхностного слоя, расположенного на глубине  $h$ , эти соотношения преобразуются к виду:

$$r'_m(t) \approx r'_m(0) + v'_{rm}t + a'_{rm} \frac{t^2}{2},$$

$$\text{где } r'_m(0) \approx r_m(0) + h \cos(\theta_m + \beta_0), \quad v'_{rm} \approx v_{rm} - h \sin(\alpha_0) \frac{W \cos(\theta_m + \beta_0)^2}{r'_m(0)},$$

$$a'_{rm} \approx a_{rm} + h \cos(\alpha_0) \left( \frac{a_{y0} \cos(\theta_m + \beta_0)^2 - a_{z0} \sin(2(\theta_m + \beta_0))/2}{r'_m(0)} \right).$$

Во втором сеансе наблюдения текущее расстояние изменится:

$$r_m(t + T_0) \approx r_m(T_0) + (v_{rm} + a_{rm}T_0)t + a_{rm} \frac{t^2}{2},$$

$$r'_m(t + T_0) \approx r'_m(T_0) + (v'_{rm} + a'_{rm}T_0)t + a'_{rm} \frac{t^2}{2},$$

$$\text{где } r_m(T_0) \approx r_m(0) + v_{rm}T_0 + a_{rm} \frac{T_0^2}{2}, \quad r'_m(T_0) \approx r'_m(0) + v'_{rm}T_0 + a'_{rm} \frac{T_0^2}{2}, \quad -\frac{T_c}{2} < t < \frac{T_c}{2},$$

$T_c$  – время синтезирования.

Как известно [1,2,4], важно определить разность фаз, а, следовательно, разность дальностей, поэтому на следующем шаге выделим разность дальностей в двух сеансах наблюдения для ровной земной поверхности и такого же заглублённого слоя:

$$\begin{aligned} \delta r_m(0) &\approx v_{rm} T_0 + a_{rm} \frac{T_0^2}{2}, \\ \delta r'_m(h) &\approx v_{rm} T_0 + a_{rm} \frac{T_0^2}{2} - h \sin(\alpha_0) \frac{W T_0 \cos(\theta_m + \beta_0)^2}{r'_m(0)} \\ &+ h \cos(\alpha_0) \left( \frac{a_{y0} \cos(\theta_m + \beta_0)^2 - a_{z0} \sin(2(\theta_m + \beta_0)) / 2}{r'_m(0)} \right) \frac{T_0^2}{2}. \end{aligned}$$

Если использовать усреднённые данные для космического комплекса с РСА [2,9]:  $W \approx 7200$  м/с,  $T_0 \approx 0,5 \dots 1$  с,  $H_{KA} = 500$  км,  $h = 5 \dots 10$  м,  $r_m \approx 600$  км,  $\alpha_0 \approx 2^\circ \dots 4^\circ$ , можно определить разность:  $\delta(h) \approx \delta r_m - \delta r'_m(h) \approx 2 \dots 4$  см. В отклонении фазы сигнала участвует двойная дальность, поэтому даже такое неглубокое залегание приведёт к отклонению по дальности сравнимому или превышающему длину волны.

То есть, разность фаз отражённых парных сигналов от земной поверхности и от подповерхностного слоя (глубина залегания 5...10 м) будут значительно отличаться, а это позволит «отделить» подповерхностный слой от земной поверхности.

К тому же, залегание подповерхностного слоя на этой глубине приведёт к относительному доплеровскому смещению

$$\delta f \approx \frac{2}{\lambda} h \sin(\alpha_0) \frac{W \cos(\theta_m + \beta_0)^2}{r'_m(0)} \approx 0,03 \dots 0,1 \text{ Гц},$$

сравнимому с шириной фильтра РСА. Поэтому, при подповерхностном мониторинге целесообразно «настраиваться» по частоте на глубину залегания анализируемого слоя.

### Обработка «двухслойного» сигнала

Для представления свойств поверхности и заглублённого слоя воспользуемся функцией радиолокационного рассеяния (РЛР) [1,2] объектов исследования:  $\mathbf{e}_{1mn}$ ,  $\mathbf{e}_{2mn}$ , представляемые в виде дискретных матриц, каждый  $m, n$ -й элемент которых, определяется как среднее на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения  $\delta x$ ,  $\delta y$  (в направлении вдоль линии визирования и в ортогональном направлении).

На выходе приёмника РЛС получим наблюдаемый сигнал, который можно записать в виде:

$$\xi(t) = s_1(t) + s_2(t, h) + n(t),$$

где  $n(t)$  – мешающий шум (белый гаусовский со спектральной плотностью  $N_0$ ).

$$s_{1m}(t) = \hat{g}(t) \sum_n \mathbf{e}_{1mn} \exp \left\{ -j \left( \frac{4\pi}{\lambda} r_m(t) \right) \right\}, \quad s_{2m}(t) = \hat{g}'(t) \sum_n \mathbf{e}_{2mn} \exp \left\{ -j \left( \frac{4\pi}{\lambda} r'_m(t) \right) \right\},$$

$\hat{g}(t)$  – множитель, учитывающий энергетические возможности РСА и изменения в зависимости от времени и типа обзора относительно центра карты,

$\hat{g}'(t)$  – учитывает потери при проникновении через границу земной поверхности и почвы до подповерхностного слоя.

Сделаем некоторые преобразования с учётом предварительного частотного совмещения и настройки на подповерхностный слой:

$$\xi(t) = s_{\Sigma}(t) + n(t),$$

где  $s_{\Sigma}(t) = \widehat{g}(t) \sum_n \mathbf{e}_{\Sigma mn}(t) \exp\left\{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} r_m(t)\right)\right\}$ ,

$$\mathbf{e}_{\Sigma mn}(t) = \mathbf{e}_{1mn} \exp\left\{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda} \delta r_m(t)\right)\right\} + \mathbf{e}_{2mn} \frac{\widehat{g}'(t)}{\widehat{g}(t)},$$

$$\delta r_m(t) \approx h \cos(\theta_m) - \frac{h \sin(\alpha_0) \cos(\theta_m)^2}{r_m} Wt.$$

Заметим, что в этом случае значение РЛР от подповерхностного слоя не изменяется во времени, а вот фаза РЛР земной поверхности, значительно отклоняется на интервале синтезирования. В технике РСА это означает, что сигнал от земной поверхности «подвергнется» подавлению.

Основой фазового мониторинга является поэлементное или групповое выделение фазовых отклонений приведённых к одному масштабу парных сигналов (комплексных РЛИ) и определение участков подповерхностного залегания.

В работе [6,9] представлен общий вариант квазиоптимального по критерию минимума СКО алгоритма оценивания многопозиционного комплекса РСА в приложении оценки местного рельефа.

В работе ставится задача оценки смещения разности фаз от обратного рельефа (залегания) с потерями и при наличии «мешающего» сигнала от земной поверхности, впрочем, и то и другое базируется на поэлементной оценке фазовой разности парных сигналов восстановленной РЛР (комплексной РЛИ) многоканального мониторинга:

$$\Phi = \arg \left\{ \hat{\mathbf{e}}_{\Sigma}(0) \hat{\mathbf{e}}_{\Sigma}(T_0)^T \right\}.$$

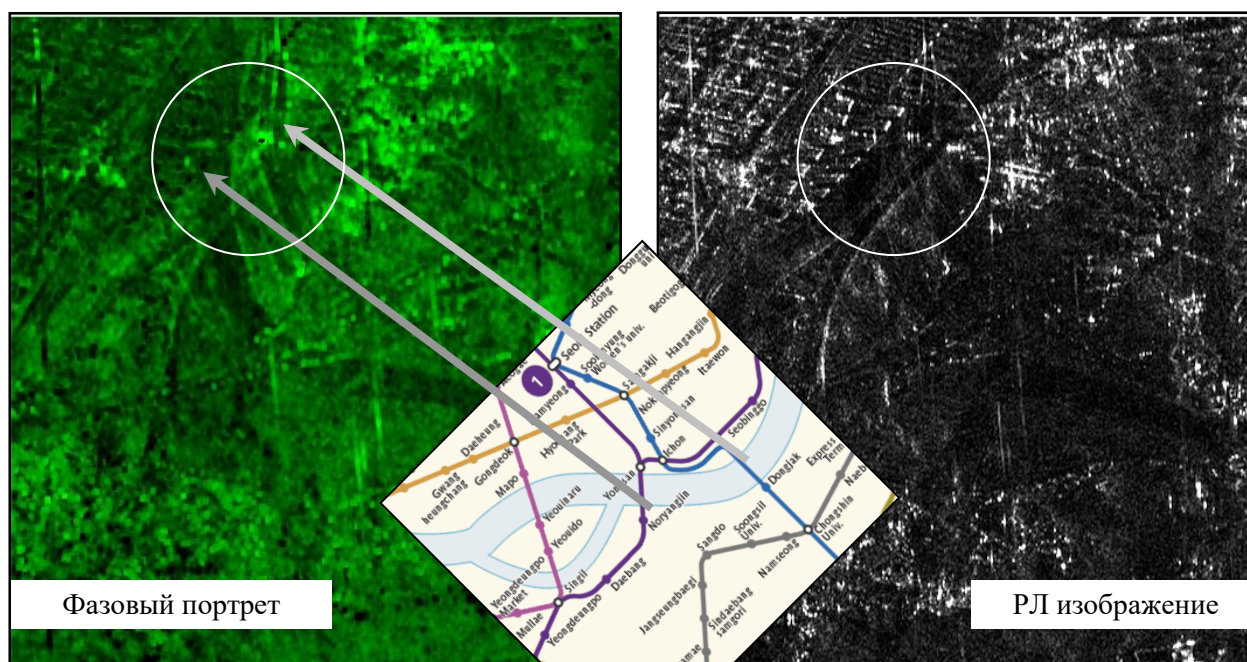
Как выяснили ранее, сигнал от земной поверхности не только будет подавлен при синтезировании, но и разность фаз парных сигналов у него будет значительно отличаться от подповерхностного.

Конечно же, уровень подавления и фазового отклонения зависит от точности настройки, длительности интервала синтезирования, величины скоса луча и много ещё от чего. Скорее всего, в условиях априорной неопределённости целесообразно несколько раз повторить обработку с настройкой на разные глубины залегания, при разных базовых параметрах интерферометра и среди этого многообразия находить возможные фазовые аномалии.

### Экспериментальная проверка

Проверка основных положений метода обнаружений подповерхностных аномалий проводилась по сигналам, записанным на борту космического комплекса РСА «Кондор-Э» [3]. Во всех приведённых ниже примерах, наблюдение проводилось при скошенном обзоре:  $\alpha_0 \approx 1^\circ$ . Расстояние между смежными сеансами наблюдения:  $X_0 \approx WT_0 \approx 2...4 \text{ км}$ . Исходная разрешающая способность РСА:  $\delta \approx 2...3 \text{ м}$ .

На рис. 2, 3 представлены фазовые портреты (ФП [9]) и РЛИ (здесь и далее с пониженной разрешающей способностью) городских построек Сеула со сложной сетью линий метро, как поверхностных, так и подземных.



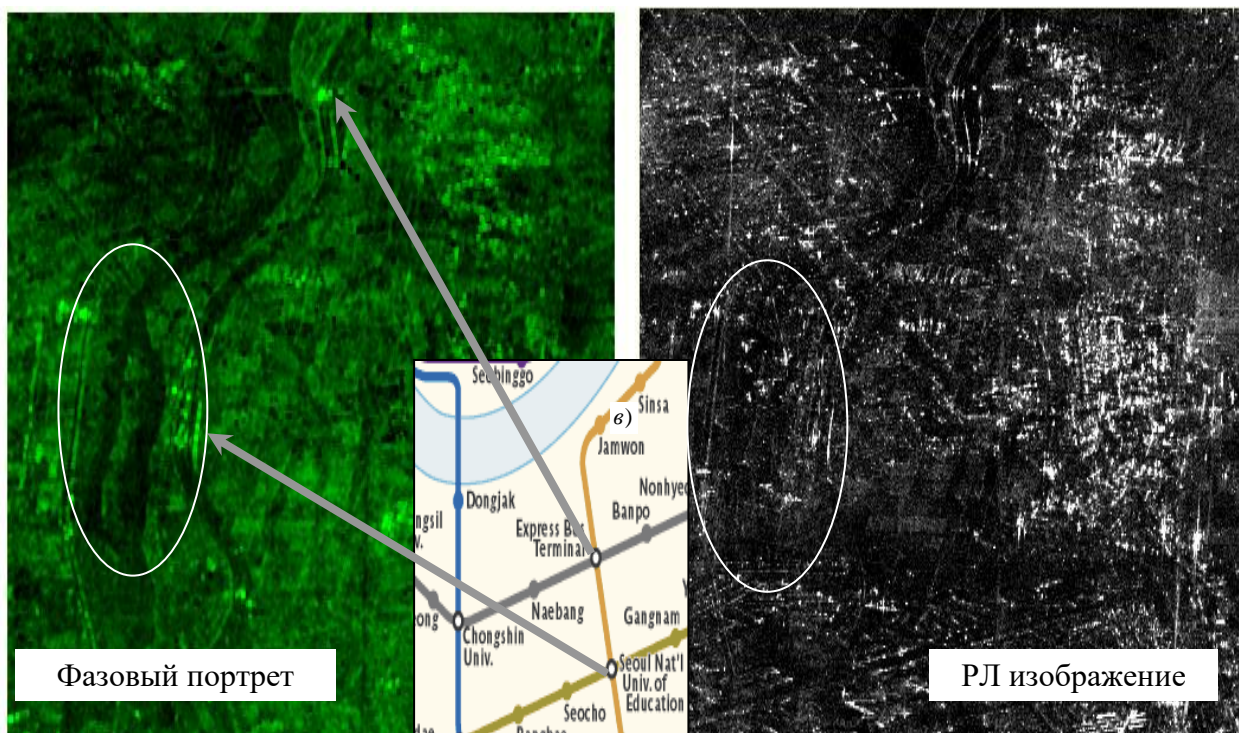
**Рис. 2. Фазовый портрет и РЛ изображение пересечения реки и двух подземных линий метро в центре Сеула**

Пара изображений рис. 2 характерна тем, что на них представлены две близко расположенных линии метро, проходящие под поверхностью реки, что видно на ФП (в круге) и практически никак не проявляется на РЛИ (тот же участок помечен кругом). Ниже приведена карта метро Сеула и стрелками указаны две соответствующие подземные ветки, обнаруженные на ФП. Дело в том, что частотная настройка была произведена именно на глубину залегания шахты метро с нулевой (чёрной) разностью фаз. Это как раз и позволило «подавить» через РСА обработку парных сигналов поверхностного слоя. Несмотря на это, река и некоторые участки поверхности на ФП отображается максимальной яркостью, скорее всего из-за движения водной поверхности и пока неизвестных особенностей локальных объектов (возможно многослойных).

Другие участки поверхности и контрастные объекты на ФП после сложных преобразований с подавлением и фазовой фильтрацией знакопеременных отклонений [9] были значительно подавлены.

В результате на ФП можно устойчиво обнаруживать подповерхностные тоннели метро даже в городе, под рекой (в условиях сложной помеховой обстановки), в то время как на РЛИ их можно видеть (если приглядеться) на фоне однородной поверхности с малой ЭПО. Скорее всего, почва этой области – песчаная и сухая, что при однородной земной поверхности обосновывает проникновение ЭМВ до 5...10 м ( $\lambda \approx 9$  см).

Пара ФП и РЛИ на рис.3 отличается тем, что представлена сложная сеть тоннелей нескольких подземных и надземных линий метро со сложными технологическими перераспределениями и несколькими выходами. Внизу представлена схема метро и стрелками отмечены на ФП две выделенные станции метро. На РЛИ городские постройки практически полностью «закрывают» подповерхностные отражения, разве что можно выделить выходы станций метро и отдельные участки на фоне однородной поверхности. А вот на ФП, после точной настройки и подавления, линии метро выделяются в виде тёмных полос.



**Рис. 3. Фазовый портрет и РЛ изображение сложной сети подземного метро Сеула**

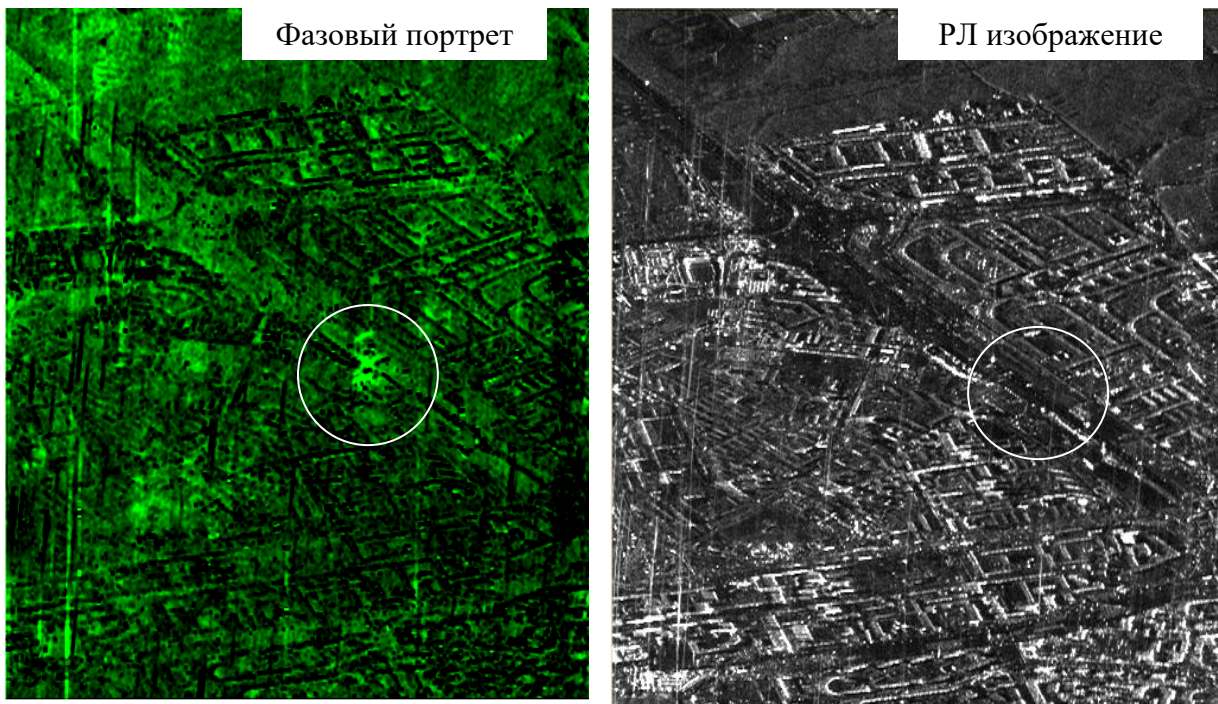
Отдельно стоит остановиться на анализе выделенного (овалом) участка на ФП и РЛИ. Это «реверсный» участок, или участок, где составы могут «разойтись». На фоне отражений от контрастных наземных объектов, на РЛИ этот сложный объект вообще не просматривается, в то время как на ФП не только обнаруживается, но просматриваются его отдельные детали.

На следующем рис. 4 представлена пара ФП и РЛИ участка, с другой структурой почвы, другой влажности. Скорее всего, в качестве почвы проникновения выступал либо сырой песок, либо суглинок, поэтому подземный тоннель выделяется не столь контрастно, но всё-таки возможно обнаружение и идентификация отдельных деталей. Хорошо, что участок метро бал неглубокого залегания ( $h \approx 1...3$  м до бетона). Вот что действительно выделяется, так это сама подземная станция и её выходы (в кружке). На РЛИ только по косвенным признакам можно догадаться о наличии здесь выхода метро. Следует также отметить, что на ФП можно отметить несколько локальных аномалий (через отклонения яркости), которые, скорее всего, также имеют многослойную структуру.

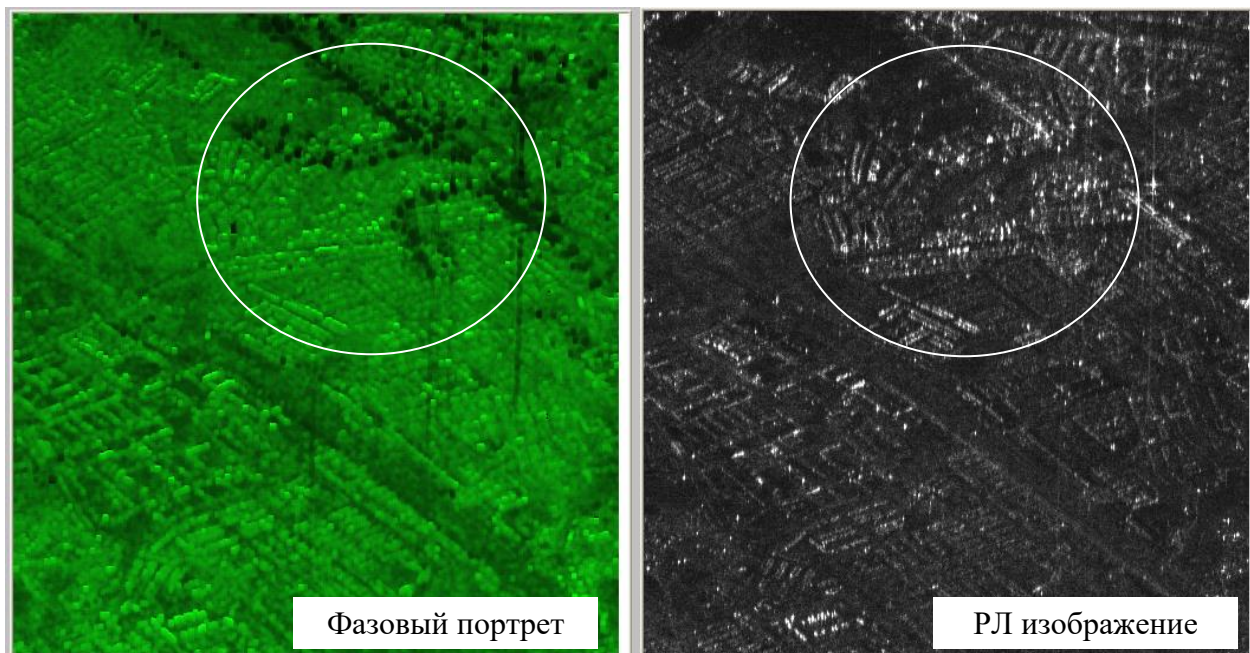
Можно сказать, что этот участок метро и прилегающий к нему участок города – действительно сложный объект для подповерхностного мониторинга, но и в этом случае интерферометрическая обработка позволяет выделять и обнаруживать протяжённые объекты на значительной глубине залегания.

В подтверждение сказанного, на рис. 5 представлен ФП и РЛИ сложного объекта типа «подземные коммуникации».





**Рис. 4. Фазовый портрет и РЛ изображение района подземной линии метро**

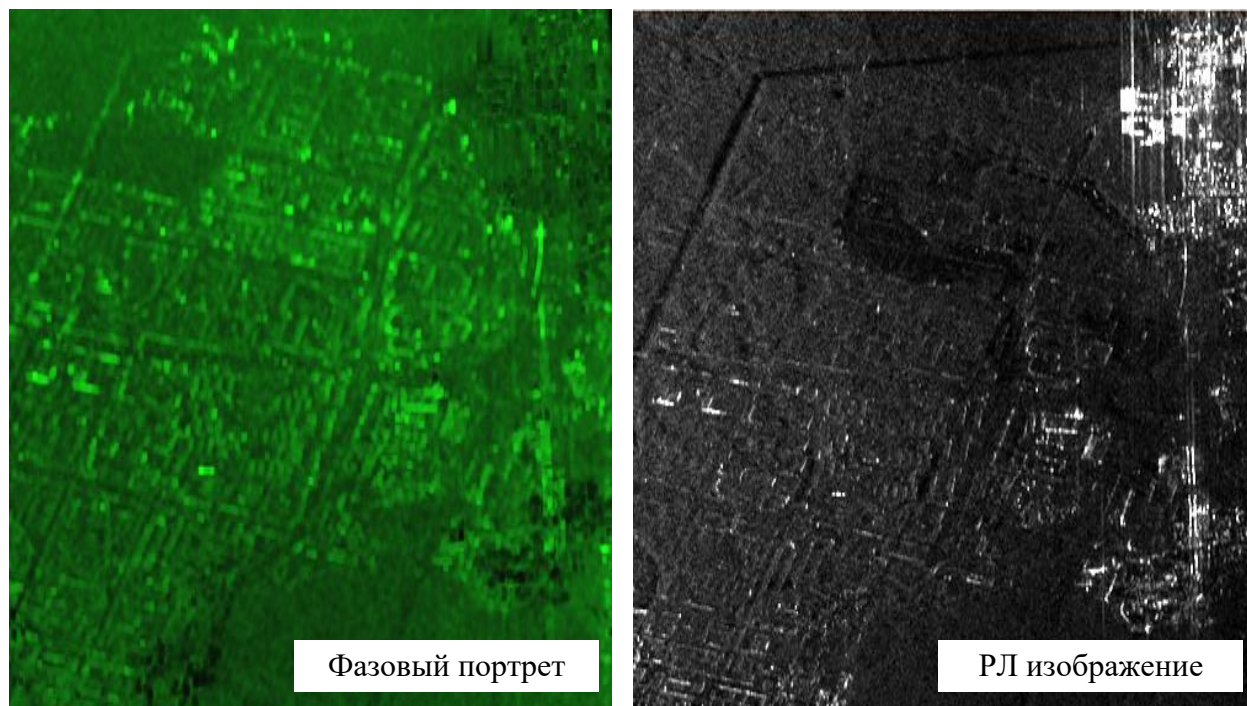


**Рис. 5. Фазовый портрет и РЛ изображение сложного объекта типа «подземные коммуникации»**

В отмеченной кругом области – сложный промышленный объект со сложной сетью коммуникаций. Частотная настройка производилась на залегание 3...6м. Легко обнаружить (чёрный уровень – нулевая разность фаз) «симметричный» подвод, скорее всего, водотеплоснабжения.

До сих пор рассматривались случаи двухслойных объектов: заглубленные линии метро с различным типом поверхностного и подповерхностного слоя, выходы метро,

коммуникации. Хотелось бы оценить возможности фазового мониторинга по другим сложным объектам. На рис. 6 пара ФВ и РЛИ демонстрирует фазовый мониторинг объектов под лесным покровом. Предполагаем, что в качестве объектов выступают невысокие строения в лесном массиве. На РЛИ видим забор, дорожки и некоторые строения, скорее всего там, где деревья не столь высоки.



**Рис. 6. Фазовый портрет и РЛ изображение сложного объекта типа «склады в лесу»**

В это время на ФП, за счёт фазоразностного разделения и частотной настройки, лесной покров «снимается» и можно видеть отдельные строения, выделенные участки и т.п.

Таким образом, возможность подповерхностного или подпокровного мониторинга зависит не только от характеристик поверхности, затухания среды, но и от алгоритмов обработки многомерных сигналов, оптимизированных под многослойную структуру отражённого сигнала. В работе обоснована двухслойная модель отражений с последующей интерферометрической обработкой сигналов однопроходного космического комплекса РСА со скошенным обзором и настройкой на определённый уровень залегания подповерхностного слоя.

### **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. — 368 с.
2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С.Вербы. — М.: Радиотехника, 2010. — 676 с.
3. 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.
4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М: Физматлит, 2007. – 544 с.
  5. 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. – С.171-181.
  6. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА // Радиотехника. – 2009. – №7. – С.62-72.
  7. Бабокин М.И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С.14-17.
  8. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. – 2014. – №7. – С.16-20.
  9. Бабокин М.И., Толстов Е.Ф. Фазовое портретирование в многоканальных РСА // VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы VII Всероссийской научной конференции (Муром, 31.05–2.06, 2016). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.287-297.
  10. Волосюк В.К., Кравченко А.В., Ксендзук А.В., Кутуза Б.Г. Оптимизация пространственно-временной обработки при подповерхностном картографировании на фоне мешающих отражений от верхней границы раздела сред // Радиотехника. – 2007. – №1. – С.24-32.
  11. Вязьмитинов И.А., Мирошниченко Е.И., Сытник О.В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами // Радиопизика и электроника. – 2007. – Том 12. – № 2. – С.426-434.