

Проблемы распознавания различных геологических неоднородностей при использовании информационных возможностей фазового портрета в РСА

М.И. Бабокин¹, А.В. Ефимов¹, В.В. Костров², В.Ю. Савостьянов³

¹АО «АЭРОКОН», 140187, г. Жуковский, Московская обл., ул. Гагарина, 1

E-mail: alexef73@mail.ru, m.baboki57@mail.ru

²МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

E-mail: yvk@mit.ru

³АО «Корпорация «Фазотрон-НИИР», 125319, г. Москва, Авиационный переулок, д.5

E-mail: v-savostyanov@yandex.ru

Представлены варианты использования космического однопроходного РСА интерферометра для обнаружения и распознавания различных геологических неоднородностей. Приведены результаты использования информационных возможностей фазового портрета для выявления различных геологических аномалий при радиолокационном мониторинге земной поверхности.

The variants of the use cosmic single-pass SAR interferometer for detection and recognition of the different geological spottinesses are presented. The results of the use the information possibilities of the phase portrait for revealing different geological anomaly under radar monitoring the terrestrial surface are broughted.

Введение

В настоящее время интерферометрические измерения в радарных технологиях позволяют решать такие сложнейшие задачи, такие как получение высокоточных цифровых моделей рельефа, мониторинг приграничных территорий, нестабильных склонов и др. [1–3]. Из ряда перспективных направлений радиолокационного мониторинга можно отметить интерферометрические фазоразностные методы, а среди вариантов построения интерферометрических комплексов своей простотой, гибкостью и достаточно высокими техническими характеристиками выделяется однопроходный интерферометр при переднебоковом или скошенном обзоре земной поверхности [4–6].

Вместе с тем, детальный анализ широкого спектра пользовательских задач дистанционного зондирования Земли подсказывает, что весьма актуальным сегодня становится подповерхностный мониторинг верхних слоев почвы [3–9]. Это, прежде всего, связано с развитием не только новых аграрных технологий “точного земледелия”, подразумевающих собой возможность оперативного получения спутниковых (и не только) снимков в реальном масштабе времени для оценки урожаев различных сельскохозяйственных культур, но и появившейся возможностью оценивать различные *техногенные риски* и *экологические угрозы* в результате хозяйственной деятельности человека.

Отметим, что сегодня для анализа динамики земной поверхности всё большее значение приобретают именно интерферометрические методы, которые позволяют анализировать различные изменения земной поверхности и выявлять даже незначительные деформации грунта. Такие данные сегодня уже могут быть доступны потребителям при использовании различных интерферометрических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (InSAR).

Так, например, в некоторых странах с ограниченными запасами пресной воды за счет их интенсивной подземной выкачки, возможно проседание почв городских застроек, что неизбежно ведет к повреждению зданий и коммуникаций. Как правило, такие проседания приводят к появлению трещин в грунте и стенах, повреждениям зданий и сдвигам земной поверхности. Такого рода уплотнение пород может быть необратимым и любая инфраструктура густонаселенного города (включая промышленные здания, аэропорты) может быть серьезно нарушена.

Что касается экологических угроз, то всегда требуется оперативный мониторинг состояния подповерхностных структур (особенно имеющих различные пустоты и трещины в ледниках) для наблюдения, контроля и предотвращения развития чрезвычайных ситуаций, связанных не только с постоянной сейсмической активностью некоторых участков Земли, но и “спящих” аномалий (таких, например, как потухшие вулканы, на некоторое время прекративших свою “активную” вулканическую деятельность). На рис. 1 (а) приведен пример радиолокационного изображения потухшего вулкана [5].

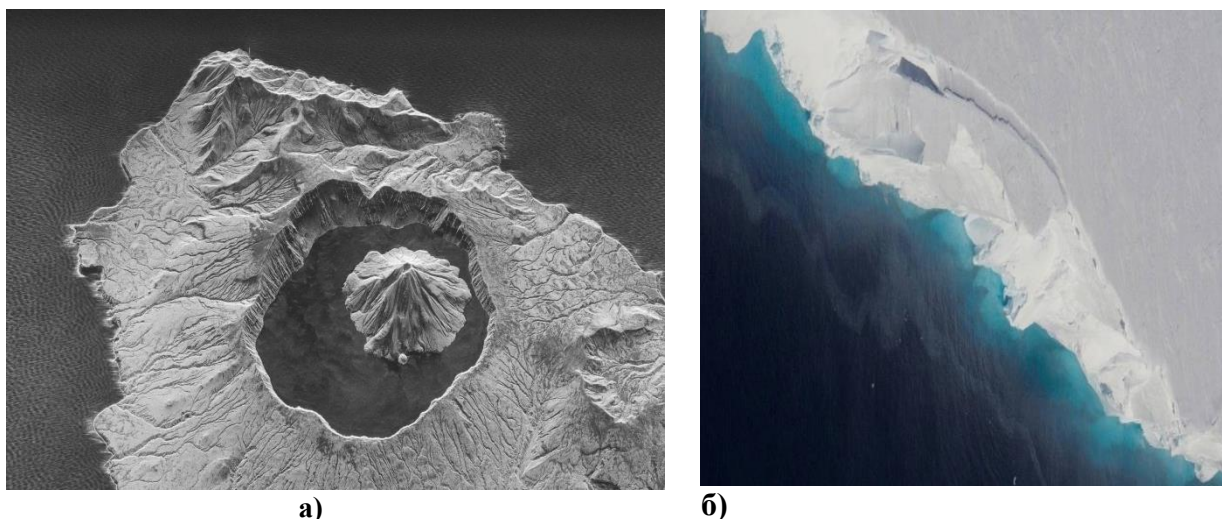


Рис. 1. Радиолокационное изображение потухшего вулкана на Курильских островах (озеро Кольцевое) (а) и оптическое изображение ледника Туэйтса в Западной Антарктиде (б).

Необходимо отметить, что и быстрое разрушение ледников Антарктиды (рис. 1 (б)) может повлечь за собой ускоренное таяние всех прочих ледников. Как следствие, это может привести к существенному повышению уровня воды в Мировом океане и к глобальному затоплению различных участков земной суши [10]. Все эти техногенные риски и экологические угрозы недооценивать непозволительно.

Цель работы: обосновать практическое применение возможностей фазового мониторинга для распознавания различных геологических неоднородностей с использованием техники однопроходной РСА интерферометрии.

Специфика подповерхностного мониторинга и проблемы распознавания геологических неоднородностей

Известна проблема подповерхностного зондирования коротковолновыми электромагнитными волнами (ЭМВ) радиодиапазона, которые, при всех своих преимуществах, имеют весьма ограниченную проникающую способность в почву, особенно покрытую растительностью, в водную среду и т.д. [1,2,4,11]. Глубокому проникновению ЭМВ этих диапазонов препятствует также относительно высокое

содержание влаги на наблюдаемых поверхностях и соответствующая этой ситуации 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 δ_3 – расстояние от границы раздела сред, на котором 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 при $\lambda = 3$ см составляет $\delta_3 \approx 2.5$ м, а при $\lambda = 9$ см составляет $\delta_3 \approx 7.5$ м. 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.

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 представляется модулем оценки. Следовательно, в процессе обработки радиоголограммы формируется так называемый *амплитудный портрет*, то есть такое изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна амплитуде сигнала, отраженного от соответствующего разрешаемого участка местности и объектов. При этом фаза сигнала РЛИ, так же как и амплитуда, содержащая определённую информацию, не используется.

Фазовый портрет (ФП) – это изображение, интенсивность каждой точки которого пропорциональна фазе сигнала, так или иначе связанного с сигналом РЛИ, отраженного от соответствующего разрешаемого участка подстилающей поверхности [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. Сам по себе фазовый портрет следует относить к статическим портретам.

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. Важно отметить, что статические портреты по каналам относятся к одному и тому же моменту времени.

Динамический фазовый портрет – это радиолокационное изображение, 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 либо изменением ее свойств.

Отметим, что использование технологии оперативного получения фазовых портретов (ФП) в РСА может существенно поднять точность прогнозов при оценке различных *техногенных* и *экологических рисков* на еще более высокий и качественный уровень [7]. Это связано с тем, что ФП позволяет обнаруживать относительные изменения различных участков земной поверхности во времени, которые могут быть, например, как различного природного, так и искусственного происхождения, и выражаться в следующих изменениях:

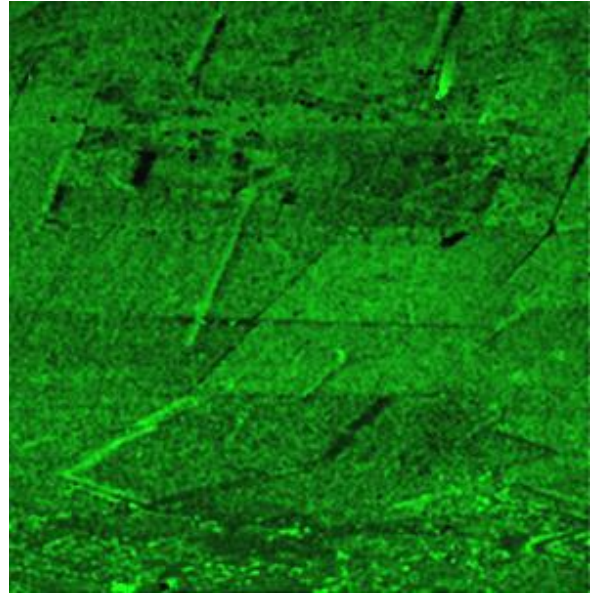
- в изменении высоты сельскохозяйственных культур на различных стадиях роста;
- в подвижках и разрушениях, возникающих в результате чрезвычайных ситуаций, землетрясений;
- в медленных и постоянно текущих процессах в глубине почв, а также в обнаружении скрытых разломов в горных породах и относительно действующих (“спящих”) вулканах;
- в деградации обваловки заглубленных нефтяных труб или их восстановления в процессе проведения профилактических работ и т.п.

Тем не менее, проверка основных положений метода обнаружений подповерхностных геологических неоднородностей и аномалий при помощи ФП проводилась по сигналам, записанным на борту космического комплекса РСА [5]. На рис. 2 – 5 дано сравнение амплитудных радиолокационных изображений и соответствующих им фазовых портретов наблюдаемых сцен.

Становится очевидным, что на основе анализа полученных фазовых портретов необходимо производить распознавание геологических неоднородностей, используя не только все возможности существующего диапазона длин волн, но и в дальнейшем задействовав существующие возможности ИК и ГИС-систем для комплексирования получаемых данных. Что касается “глубины” фазового портретирования, то она будет определяться тем, насколько земной покров или объекты на поверхности «позволят» проникнуть ЭМВ под поверхность – все будет зависеть не только от характеристик поверхности, затухания среды, но и от алгоритмов обработки многомерных сигналов, оптимизированных под многослойную структуру отражённого сигнала.



а)

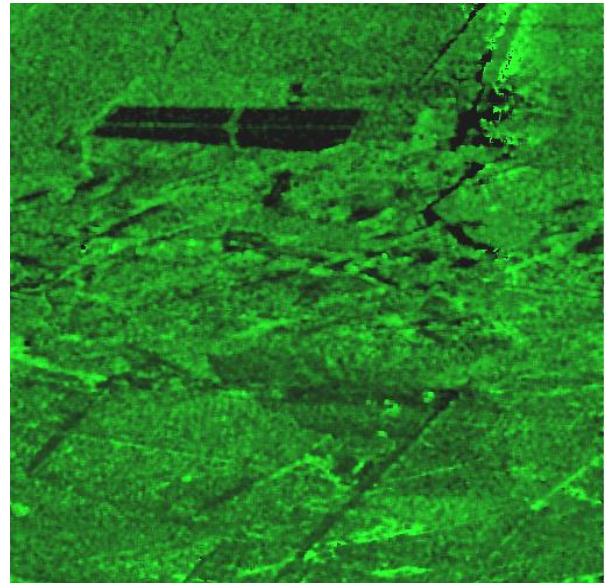


б)

Рис. 2. Радиолокационное изображение поля сельскохозяйственного назначения (а) и его фазовый портрет (б)



а)



б)

Рис. 3. Радиолокационные изображения гражданского аэропорта (а) и его фазовый портрет (б)

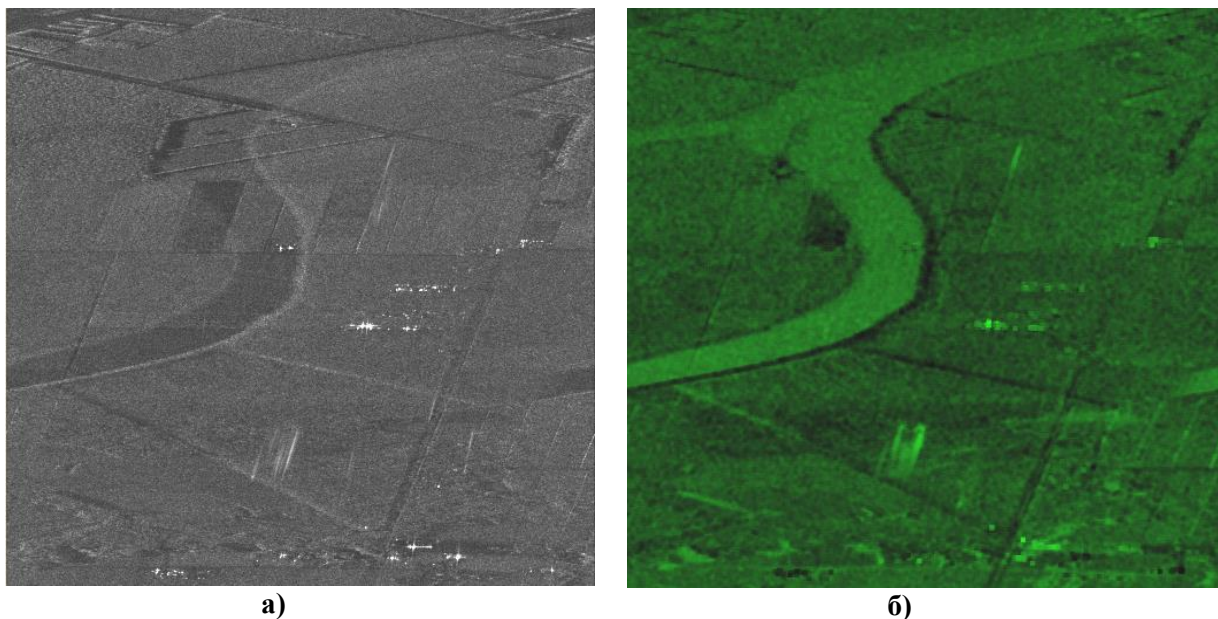


Рис. 4. Радиолокационное изображение поля сельскохозяйственного назначения с разливом речных вод (а) и его фазовый портрет (б)

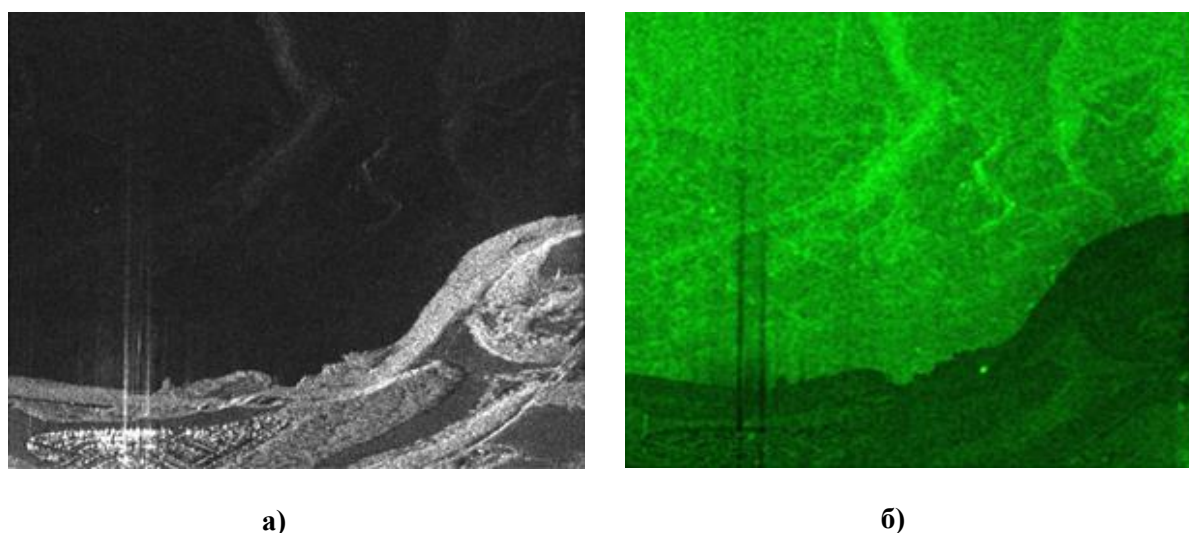


Рис. 5. Радиолокационные изображения морской прибрежной полосы (а) и ее глубоководные течения на фазовом портрете (б)

Выводы

1. Использование технологии получения фазовых портретов в РСА позволит получать уникальные индивидуальные решения для оперативного мониторинга различных геофизических явлений, а также продвигать различные услуги по обработке и анализу полученных данных (программные продукты в виде приложений), позволяющих принимать рациональные решения в таких областях, как:

- ✓ инженерная геология труднодоступных для человека мест;
- ✓ распознавание земных покровов (кадастры), измерение толщины льдов, измерение глубины пресноводных водоёмов, формирование радиолокационных изображений толщи и дна пресноводных водоёмов, определение влагосодержания почвы и обнаружение подземных водоемов;
- ✓ обнаружение разливов нефти на морской поверхности и под ней (на глубине);

- ✓ мониторинг заглублённых трубопроводов, мониторинг подземных линий электропередачи;
- ✓ подземные археологические наблюдения;

2. На сегодняшний день пока остается не решенной основная проблема – это технология автоматического распознавания (дешифрирования) получаемых изображений геологических неоднородностей на основе фазовых портретов, которая может быть огромным источником дохода для производителей и поставщиков различного рода услуг.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.
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.
3. Замятин А.В., Марков Н.Г. Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Бабокин М.И. Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы, №8, 2010.
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.
6. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Титов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника, №7, 2014.
7. Бабокин М.И., Толстов Е.Ф. Фазовое портретирование в многоканальных РСА // 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.
8. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / Под ред. В.Ф. Кравченко. – М: Физматлит, 2007.
9. 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, №1, 2007.
10. Milillo P., Rignot E., Rizzoli P., Scheuchl B., Mouginot J., Bueso-Bello J., Prats-Iraola P.. Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica // Science Advances, 5 (1), 2019.
11. Вязьмитинов И.А., Мирошниченко Е.И., Сытник О.В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами. // Радиотехника и электроника, Т. 12, №2, 1967.