

Исследование фазовой стабильности отражения сигнала РСА яркими точечными элементами линейной промышленной инфраструктуры в Якутии

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН)
141190 Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1
E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru*

Исследована фазовая стабильность отражения сигнала космического РСА Sentinel-1A группой ярких точечных элементов линейной промышленной инфраструктуры на юге Якутии. Показано, что, в зависимости от сезона наблюдения (влияющего на стабильность подстилающей поверхности), исследованные объекты могут быть использованы для оценки точности интерферометрических измерений разности фаз и, соответственно, смещений подстилающих покровов.

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), радиолокационная интерферометрия, динамика поверхности, точечные отражатели, Sentinel-1

Study of the phase stability of the SAR signal scattered by bright point-like elements of industrial infrastructure in Yakutia

L.N. Zakharova, A.I. Zakharov

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, RAS (Kotelnikov FIRE RAS).

The phase stability of the Sentinel-1A SAR signal scattered by a group of bright point-like elements of industrial infrastructure in the south of Yakutia was studied. It was shown that, depending on the observation season (stability of the underlying surface), the objects under study may be used to assess the accuracy of interferometric measurements of the phase difference and, accordingly, displacements of the underlying covers.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), interferometric SAR (InSAR), surface dynamics, point-like scatterers, Sentinel-1

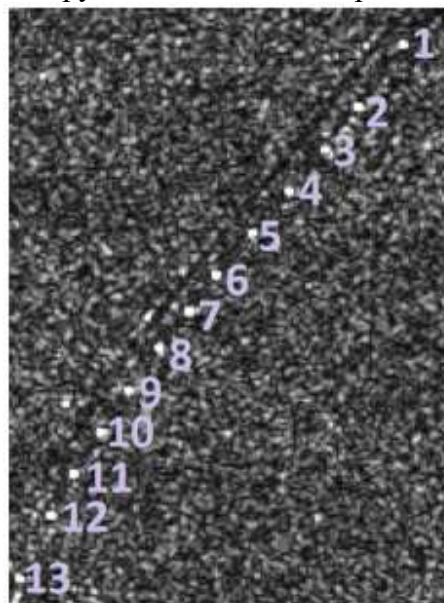
Введение

Вопросы оценки точности фазовых измерений в интерферометрической схеме съемки неизбежно возникают при планировании измерений рельефа или оценки стабильности подстилающих покровов. Высокий уровень сигнала объектов с большой эффективной площадью рассеяния позволяет снизить влияние внешних факторов (среды распространения сигнала, мешающих отражений подстилающих покровов) и подчеркнуть аппаратную составляющую ошибок измерений. Угловые отражатели, активные приемо-передатчики (транспондеры) широко используются для оценки фазовых шумов аппаратуры в интерферометрической съемке. Одним из таких примеров может быть работа [1], где в съемке сюжета с угловыми отражателями в зоне газопровода в Краснодарском крае радаром X-диапазона TerraSAR-X была продемонстрирована возможность миллиметровой точности измерений смещений углов на оползневом склоне. В настоящей работе оценена фазовая стабильность группы отражателей, расположенных вдоль объекта инфраструктуры.

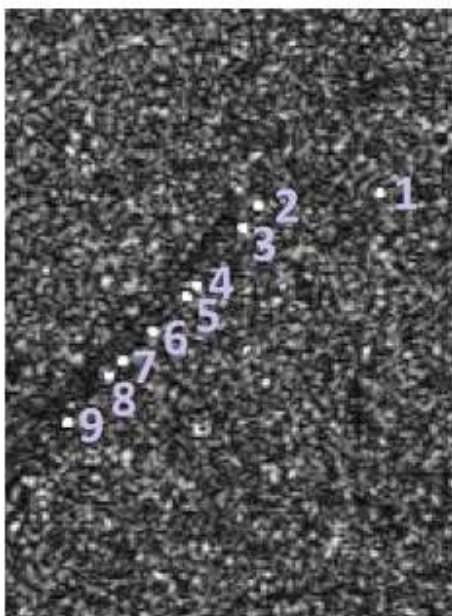
Результаты интерферометрической обработки

Для анализа внутригодовой фазовой стабильности выявленного нами в южной части Якутии набора ярких отражателей было выбрано 9 пар съёмок Sentinel-1 с интервалом 12 дней, начиная с августа 2020 года и заканчивая июнем 2021 года. Все пары, кроме одной, сняты с нисходящего витка орбиты.

В первой группе компактно расположенных отражателей их цепочка вытянута преимущественно с севера на юг, при этом отражатель №1 занимает самое северное положение, отражатель №13 — самое южное (см. пронумерованные яркие точки на рис. 1а). Во второй группе всего 9 отражателей, их расположение показано на рис. 1б). Длина цепочки от первого отражателя до последнего в первой группе — около 2,5 км, во второй группе — около 1 км; расстояние между группами — 4,5 км.



а)



б)



в)

Рис. 1. Фрагменты амплитудного изображения Sentinel-1 от 4.08.2020:

а) первая группа, б) вторая группа;

в) изображение Google Earth с положением крайних отражателей каждой группы

Отражатель №2 из первой группы продемонстрировал наиболее нестабильное поведение как амплитудной, так и фазовой составляющей на протяжении всего срока наблюдений. Так, с.к.о. ЭПР других отражателей колеблется около 0,5 дБ, тогда как для отражателя №2 эта величина составляет 4 дБ. Возможное объяснение состоит в наличии дефекта закрепления отражателя или кратковременном затенении его растительностью. В связи с заметными отличиями от стабильности остальных отражателей он был исключён из дальнейшего рассмотрения.

Для анализа фазовой картины были сформированы 8 интерферограмм с 12-дневным интервалом и одна с 24-дневным. Затем для возможности сравнения фазовых значений между интерферограммами, полученными в различные даты, была введена фазовая поправка в виде вычитания фазовой константы. Поскольку местность, окружающая отражатели первой и второй группы, имеет несколько отличающиеся характеристики, для каждой группы эта поправка своя и равна величине интерферометрической разности фаз, измеренной для первого по счёту отражателя группы. Таким образом, в каждой из групп измерены взаимные смещения отражателей относительно первого. На рис. 1в) показан фрагмент оптического изображения Google Earth с положением обеих групп. Вторая группа (северная) расположена на территории с относительно однородным характером естественных покровов, тогда как первая, более протяжённая, располагается на более пятнистом фоне, что говорит о различиях в типе растительности и почвы. Анализ амплитудных изображений показывает, что местность вокруг второй группы болотистая, бывают сезоны, когда её заливают вода. Так, на рис. 2 цепочка отражателей первой группы видна на фоне существенно более тёмном, чем вторая. Слабый уровень сигнала может свидетельствовать о почти зеркальном отражении от гладкой водной поверхности, образовавшейся в результате снеготаяния.

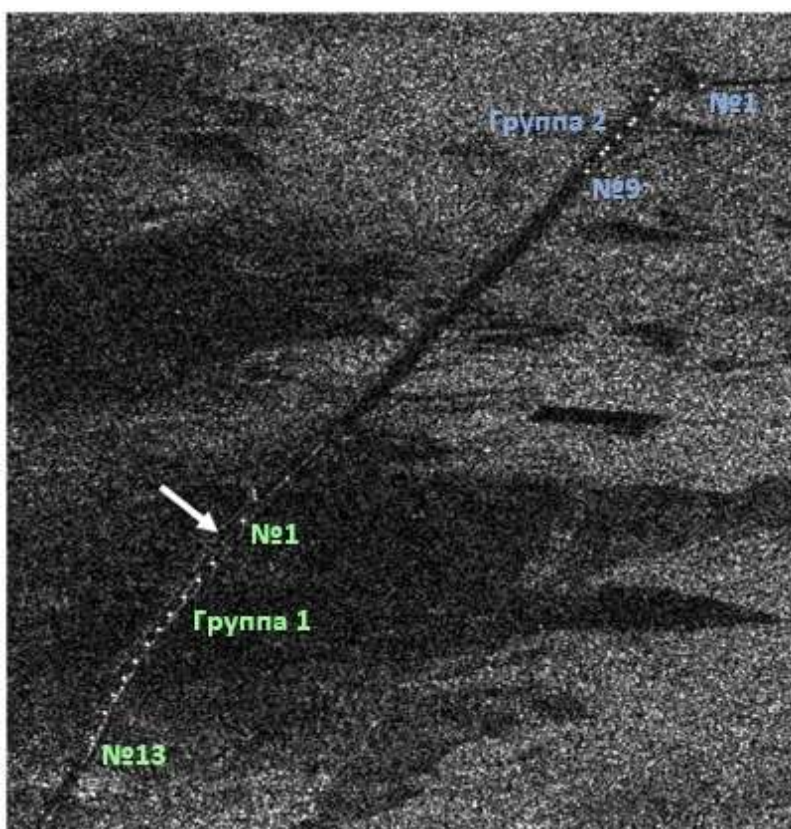
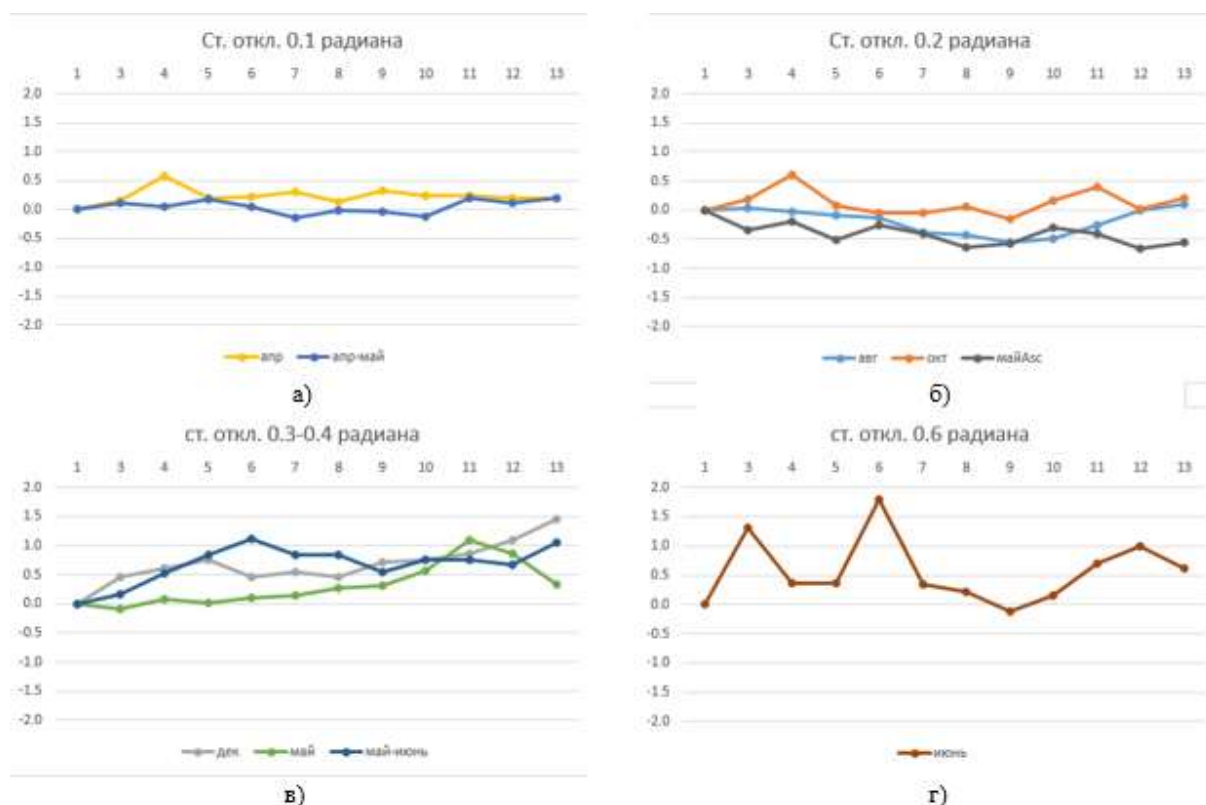


Рис. 2. Фрагмент изображения Sentinel-1 от 7.05.2021, включающий обе группы отражателей. Стрелкой указано положение отражателя №2 группы 1

Заметим также, что на августовском изображении (рис. 1) фон у обеих групп не имеет таких ярких отличий, как здесь. Кроме того, на рис. 2 отсутствует яркая точка на месте отражателя 2 (его положение указано стрелкой), что иллюстрирует провал в его отражательных свойствах в эту дату.

На рис. 3 представлены значения интерферометрической разности фаз в девяти измерениях для отражателей первой группы. Для удобства восприятия девять наблюдений (т.е. девять интерферограмм) разбиты на четыре страты, в зависимости от величины с.к.о. для всех двенадцати включённых в рассмотрение отражателей.



**Рис. 3. Взаимные фазовые отклонения группы 1 по отношению к первому отражателю.
По горизонтали: номер отражателя; по вертикали: разность фаз**

Наиболее стабильное поведение (небольшие колебания около нуля) показывают две пары с первой датой съёмки 13.04.2021 и 25.04.2021, соответственно (рис. 3а). Значения разности фаз для этих двух интерферограмм укладываются в трубку 0,6 радиана вокруг нулевого отклонения, и даже более того: все, кроме отражателя №4, укладываются в трубку радиусом 0,3 радиана, что соответствует радиальному смещению 1,3 мм.

Измерения в три даты на рис. 3б) имеют с.к.о. 0,2 радиана, и любое смещение любого отражателя в этой группе отклоняется от нуля не более чем на 0,7 радиана (соответствующее радиальное смещение составляет 3,1 мм).

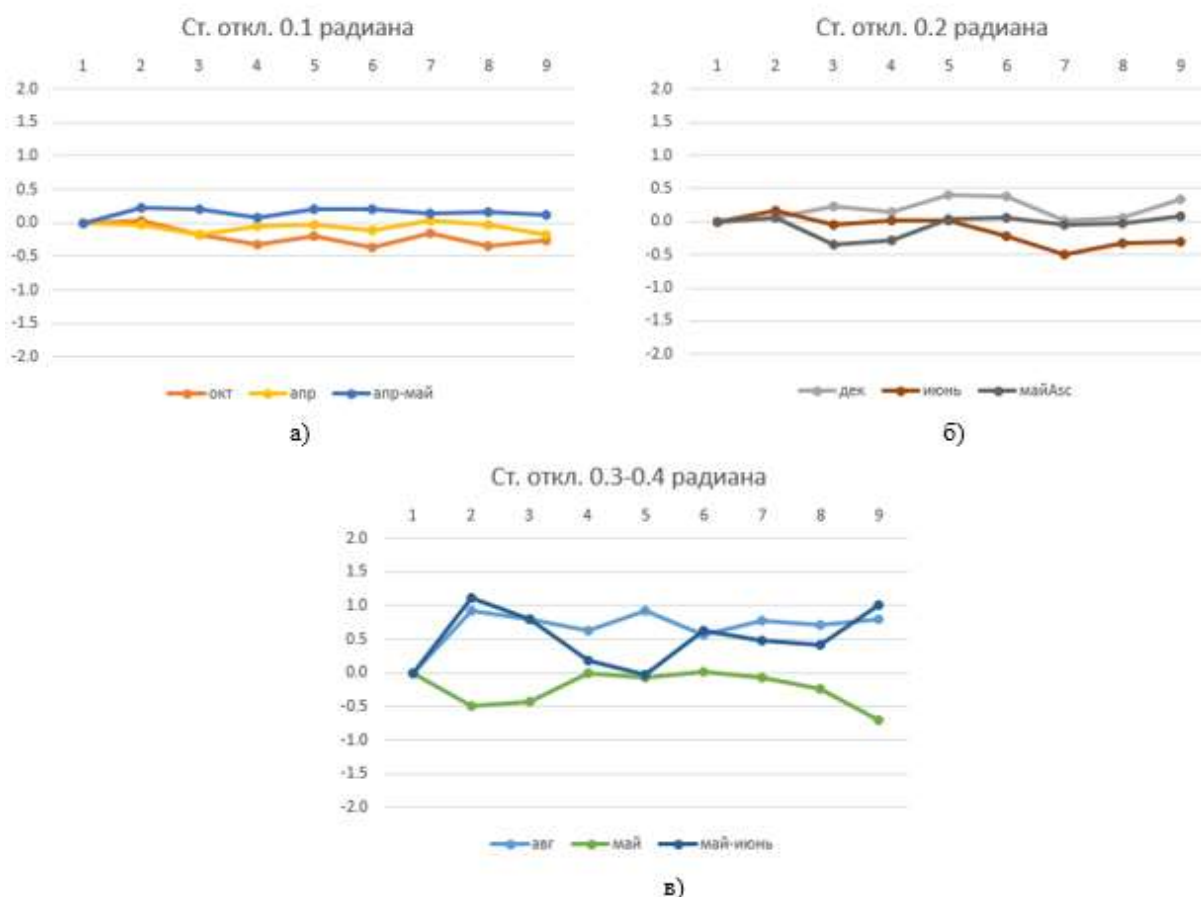
Три измерения на рис. 3в) имеют общее свойство: тенденцию к росту разности фаз от первого отражателя группы к тринадцатому. Среди них есть и пара, первое изображение которой приведено на рис. 2. Это май 2021 года (зелёный цвет графика на рис. 3). Ещё одна пара на рис. 3в) соответствует датам 19.05.2021-12.06.2021 (синий график). Это единственная пара среди рассмотренных с интервалом 24 дня, а не 12, смещения на ней накоплены за вдвое больший промежуток времени. При этом значение с.к.о. у этой пары минимальное на этом графике (0,3, а в двух других парах 0,4), так что, будь промежуток короче, смещения оказались бы меньше, и пара попала бы в лучшую категорию по с.к.о. Максимальное отклонение также демонстрирует не 24-дневная пара,

а 12-дневная декабрьская (серый график на рис. 3в). Оно составляет 1,4 радиана, что соответствует 6,2 мм радиального смещения. Сравнение измерений в парах с первой датой в мае (синий и зелёный график на рис. 3в) с единственным измерением с восходящего витка (тоже майским, серый график на рис. 3б) показывает обратный ход фазы от первого отражателя к тринадцатому: на восходящем витке фаза, наоборот, уменьшается. Это говорит о том, что основная составляющая смещения, вероятно, горизонтальная, поскольку вертикальное смещение дало бы одинаковый результат на интерферограммах с противоположных витков.

Июньская интерферограмма (рис. 3г) демонстрирует наиболее нестабильное поведение фазы отражателей, особенно выделяются отражатель №3 и отражатель №6, с.к.о. здесь составляет 0,6, максимальное отклонение от 0 равно 1,8 радиана (а без учёта отражателей №3 и №6 — 1 радиан), что в пересчёте на радиальные смещения составляет 8 мм (без отражателей №3 и №6 4,5 мм).

Таким образом, в этой группе наиболее стабильные показатели наблюдаются в апрельских съёмках, где с.к.о. отражателей составляет всего 0,1 радиана (что соответствует радиальному смещению 0,4 мм).

На рис. 4 приведены аналогичные графики для второй группы отражателей, измерения проведены по тем же интерферограммам, что и для первой группы.



**Рис. 4. Взаимные фазовые отклонения группы 2 по отношению к первому отражателю.
По горизонтали: номер отражателя; по вертикали: разность фаз**

В лучшую страту по параметру с.к.о. снова, как и для группы 1, попадают измерения с первой датой съёмки в апреле (жёлтый и синий цвет линий), а также октябрьские измерения, для группы 1 оказавшиеся менее удачными. Максимальное отклонение от

нуля в этой группе составляет 0,4 радиана, что соответствует 1,8 мм радиального смещения.

В страте с.к.о. 0,2 радиана — октябрьские измерения 2020-го года, июнь 2021-го, а также майские измерения с восходящей орбиты. Заметим, что июньская пара была наихудшей в первой группе (см. рис. 3г), тогда как для второй группы максимальное отклонение от нуля в июне составляет -0,5 радиана, являясь при этом и максимальным отклонением для всей страты на рис. 4б). Такое отклонение соответствует радиальному смещению 2,2 мм.

В страту с.к.о. 0,3-0,4 радиана (рис. 4в) попадают остальные три измерения, два из которых и в группе 1 также в этой страте, а одно — августовское — в группе 1 показывало чуть лучшее с.к.о. Максимальное отклонение от нуля здесь составляет 1,1 радиан, что соответствует радиальному смещению 4,9 мм. Основная деталь, обращающая на себя внимание на рис. 4в) — зеркальное поведение отражателей в соседних парах мая и июня (пара 7.05-19.05, показанная зелёным цветом, и 19.05-12.06, тёмно-синий цвет). Поскольку обе эти пары сняты с нисходящего витка орбиты, то есть с одного направления, противоположные смещения отражателей №2, №3 и №9 свидетельствуют о том, что отражатели испытывали в эти соседние интервалы времени смещения в противоположных направлениях, или, что вероятнее, о наличии мелкомасштабных атмосферных неоднородностей в общую дату, 19 мая 2021, влияние которых вошло в разность фаз с противоположными знаками.

В результате анализа обеих групп отражателей можно заключить, что фазовая стабильность отраженного ими сигнала может достигать десятой доли радиана, то есть оценка радиальных смещений с их помощью может быть проведена с точностью до первых миллиметров.

Заключение

Фазовая стабильность отражений сигналов РСА группой ярких точечных отражателей в зоне промышленной инфраструктуры в Якутии может достигать десятой доли радиана (точность оценки радиальных смещений порядка первых миллиметров), что позволяет использовать эти объекты для фазовой калибровки космических РСА при условии выбора сезона года с минимальными сезонными деформациями подстилающих покровов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. А.И. Захаров, Л.Н. Захарова, М.Г. Красногорский. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя// Исследование Земли из космоса, 2018, № 3, с. 80–92.