

Особенности радиолокационных изображений мостов на примере съёмки Sentinel-1

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, М.В. Сорочинский

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, e-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

В работе представлен анализ изображений мостов, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1. Рассмотрены различные аспекты РСА-изображений мостов, такие как кратные изображения, влияние наличия/отсутствия ледового покрова вокруг моста, особенности конструкции моста. Приведены результаты интерферометрической обработки пар изображений Sentinel-1, иллюстрирующие стабильность/подвижность элементов снимаемых мостов.

The paper presents analysis of Sentinel-1 SAR images of bridges. Different aspects of bridges imaging are discussed: multiple images, water/ice surface under a bridge, bridge construction details. Interferometric processing of Sentinel-1 pairs of images gives phase values illustrating a bridge possible displacement/stability.

Введение

Радиолокационные изображения земной поверхности из космоса в последние десятилетия становятся всё более значимым источником информации о происходящих изменениях благодаря совершенствованию конструктивных особенностей радиолокационной аппаратуры, а также методик съёмки. Пространственное разрешение радиолокационных изображений, достигающее первых метров, а также орбитальный сценарий повторяющихся орбит, позволяет проводить интерферометрическую обработку снимков со спутников Sentinel-1 с целью обнаружения нарушений стабильности и оценки малых смещений для таких инженерных сооружений, как мосты.

Особенности расположения мостов (над водной/замёрзшей поверхностью), наличие выступающих и сильно отражающих элементов конструкции приводят к эффектам удвоения изображений мостов, а также наложению фрагментов изображения друг на друга. Будучи стабильными отражателями, мосты на интерферограмме могут демонстрировать полезное значение разности фаз, даже если отражательные свойства окружающего ландшафта за время между съёмками заметно изменяются, приводя к полной декорреляции.

Строящийся Керченский мост

По свежим снимкам 2017 года можно отследить скопления большого количества льда с северной стороны технического моста через Керченский пролив [1]. Поскольку постоянный напор ледовой массы может оказать влияние на состояние конструкций, первоначальной целью исследования была интерферометрическая обработка пары снимков с близкими датами, охватывающими интервал времени, за который произошло таяние льда, для оценки значений интерферометрической фазы на конструкциях моста.

Разность фаз $\Delta\varphi$ при условии коррелированности сигналов первой и второй съёмки может быть преобразована в величину сдвига d отражающей поверхности по отношению к точке съёмки (вдоль направления распространения сигнала) по формуле [2]

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d, \quad (1)$$

где λ — длина волны,

$\Delta\varphi$ — разность фаз на интерферограмме между элементами изображения, один из которых соответствует (локально) неподвижному участку поверхности, и тогда d — величина проекции сдвига второго (подвижного) участка на линию визирования.

Как видно из формулы (1), величине сдвига на $\lambda/2$ соответствует изменению разности фаз на период 2π .

Прежде чем вычислять величину сдвига, следует оценить величину интерферометрической когерентности, показывающую степень декорреляции сигналов:

$$\gamma = \frac{E(z_1 z_2^*)}{E(|z_1|^2)E(|z_2|^2)}$$

($|\gamma| = 0$ при полной декорреляции и $|\gamma| = 1$ при идеальной коррелированности). При абсолютном значении когерентности менее 0.2 измеренная разность фаз практически случайна и не несёт информации о подстилающих покровах.

На рис. 1 показаны амплитудное изображение, карта интерферометрической когерентности и фаза для интерферометрической пары 11-23 февраля 2017 года.

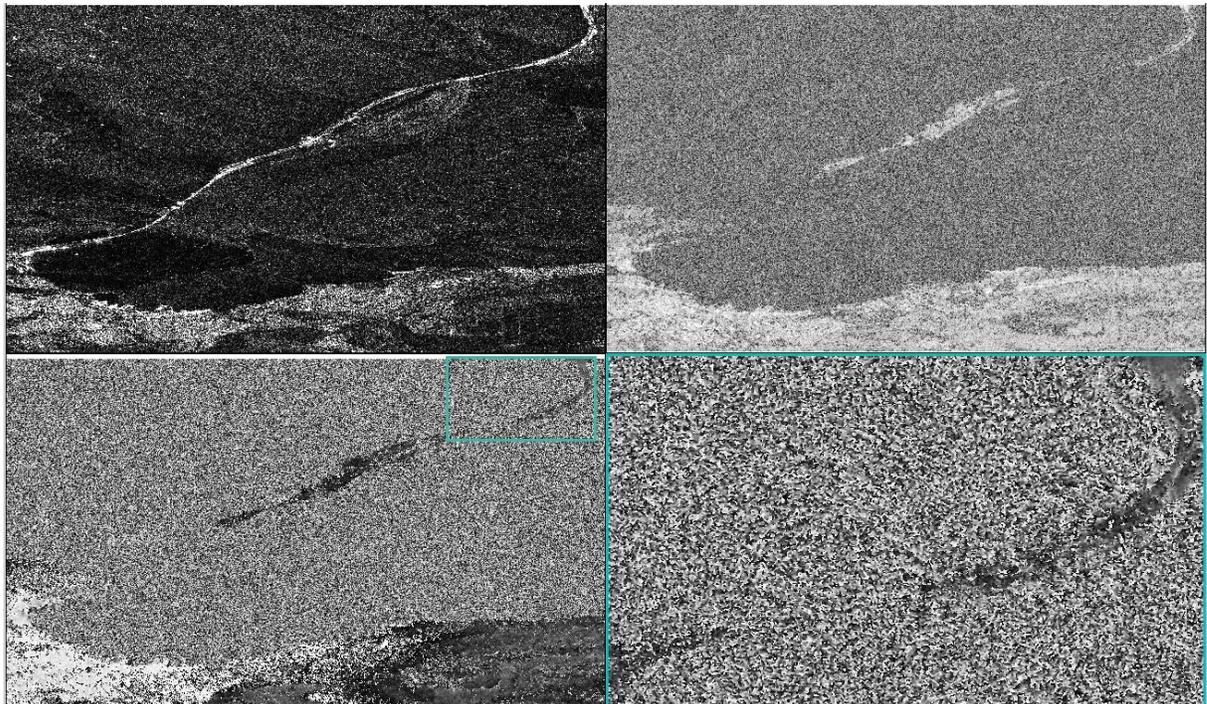


Рис. 1. Результаты интерферометрической обработки пары изображений 11.02-23.02 2017.
Вверху: Амплитудное изображение 11.02.2017 (слева) и карта когерентности (справа)
Внизу: Интерферометрическая фаза (слева) и её увеличенный фрагмент (справа)

Можно видеть, что нитка технологического моста, чётко прослеживая на амплитудном изображении (слева вверху), становится прерывистой на карте когерентности (справа вверху), что означает сильную декорреляцию, в свою очередь, свидетельствующую об изменении отражательных свойств поверхности между съёмками. Внизу на рис. 1 показана собственно интерферограмма для того же фрагмента изображения (слева) и увеличенный участок части моста со стороны Таманского полуострова.

Видно, что в месте исчезновения когерентности фазовая картина полностью зашумлена. Таким образом, данная пара изображений непригодна для количественной оценки возможных смещений технологического моста, однако даёт представление о механизме рассеяния: вероятно, яркий обратный сигнал от конструкций моста, чётко видимый на обоих амплитудных изображениях, приходит не от его горизонтальной поверхности, которая довольно гладкая (рис. 2), а в результате двойного переотражения сигнала сначала от боковой поверхности моста, а затем от поверхности воды (или в обратном порядке). При таком механизме интерферометрическая фаза является зависимой от микрорельефа поверхности воды в моменты съёмки, который постоянно меняется, и вполне закономерным оказывается сильное снижение когерентности и «рассыпание» фазы на случайные значения.



Рис. 2. Вид на технологический мост, фото

Стригинский мост через Оку под Нижним Новгородом

Несмотря на продемонстрированное выше снижение когерентности при двойном переотражении сигнала по типу двугранного уголкового отражателя, существуют условия съёмки, при которых когерентность сигнала сохраняется, и возможно наблюдать фазу на интерферограмме. На рис. 3 показаны (слева направо) амплитудные изображения, когерентность и интерферограмма (разность фаз) для двух пар снимков, полученных зимой (верхний ряд) и в начале осени (нижний ряд).

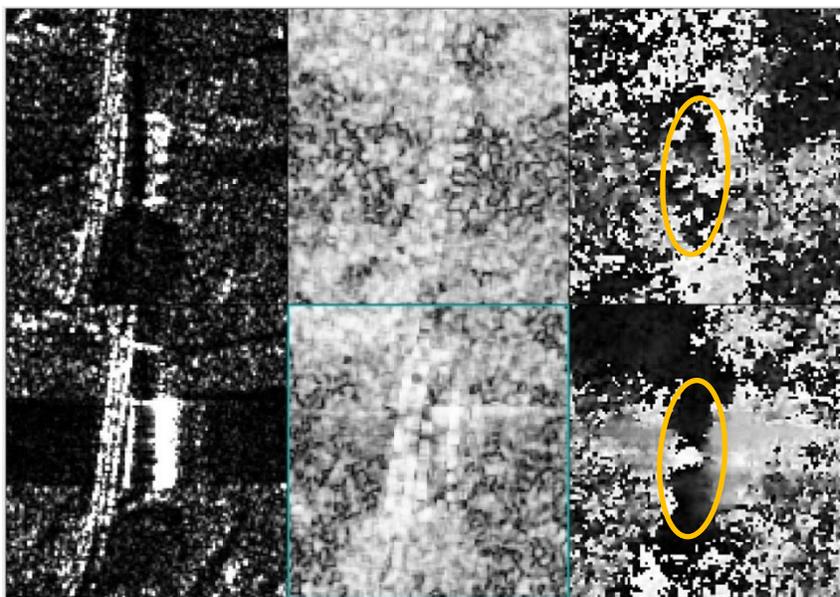


Рис. 3. Результаты интерферометрической обработки зимней (вверху) и осенней (внизу) пар изображений Sentinel-1 Нижегородской области, окрестности Стригинского моста через Оку.

Слева: амплитудные изображения, полученные 24.01.2017 и 14.09.2016, по центру: когерентность для зимней и осенней пар, справа: фаза для зимней и осенней пар

Река проходит широкой горизонтальной полосой по центру кадра, мост пересекает её, располагаясь вертикально. В верхнем ряду расположены результаты обработки пары 24.01.2017-05.02.2017, в нижнем — 14.09.2016-26.09.2016. Временной интервал между съёмками в обоих случаях составляет 12 дней.

Следует обратить внимание на то, что мост представлен на изображении не в единственном экземпляре, его изображений несколько. Рассмотрим каждое в отдельности.

Во-первых, непосредственное обратное отражение от моста. Верхняя горизонтальная поверхность моста заасфальтирована, поэтому обратное рассеяние от неё весьма слабое, однако на мосту есть ограждения и разделительная полоса (рис. 4а), элементы которых являются сильными отражателями, что даёт три «нитки» на амплитудном изображении, разделённые почти не отражающими тёмными полосками. Когерентность на этих трёх полосах моста существенно лучше той, что была в предыдущем случае (на всём мосту значения когерентности выше 0.6 и в зимней паре, и в осенней). «Провалы» между ярко отражающими нитками на карте когерентности исчезают, поскольку когерентность вычисляется не поточечно, а в некоторой окрестности каждого элемента изображения.

Справа от трёх «ниток», составляющих непосредственное обратное рассеяние, расположена ещё одна, несколько утолщённая яркая полоса. В отличие от трёх основных ниток эстакады, тянущихся вверх и вниз до края фрагмента изображения, эта четвёртая полоса строго ограничена берегами реки, поскольку является результатом двойного переотражения от боковой поверхности моста, обращённой к точке съёмки, и воды. На осеннем амплитудном изображении (рис. 3, слева внизу) эта четвёртая линия выражена чётче, чем на зимнем (рис. 3, слева вверху), поскольку вода является лучшим отражателем, чем лёд. Когерентность для этого типа отражения (двугранный угол) для обоих сезонов лучше, чем в случае с крымским мостом, однако зимой видны явные провалы в её значениях.

Наконец, третье изображение — широкая полоса ещё правее, на некотором расстоянии от первых двух. Здесь механизм отражения с ещё большей кратностью переотражений: спутник – вода – нижняя поверхность моста (обращённая к воде) – вода – спутник. Поскольку путь сигнала при этом увеличивается, он приходит с большей задержкой и располагается на большей дальности, чем первое изображение. Здесь так же видна разница в амплитудных изображениях: снова из-за лучшей «зеркальности» воды по сравнению со льдом осеннее изображение намного ярче. Но, что интересно, изображение нижней стороны моста в обоих случаях заметно ярче верхней. Причина заключается в том, что снизу мост состоит из сети металлических балок, являющейся сильным отражателем (рис. 4б, по центру вверху врезка с искусственно поднятым контрастом для лучшего различения деталей).

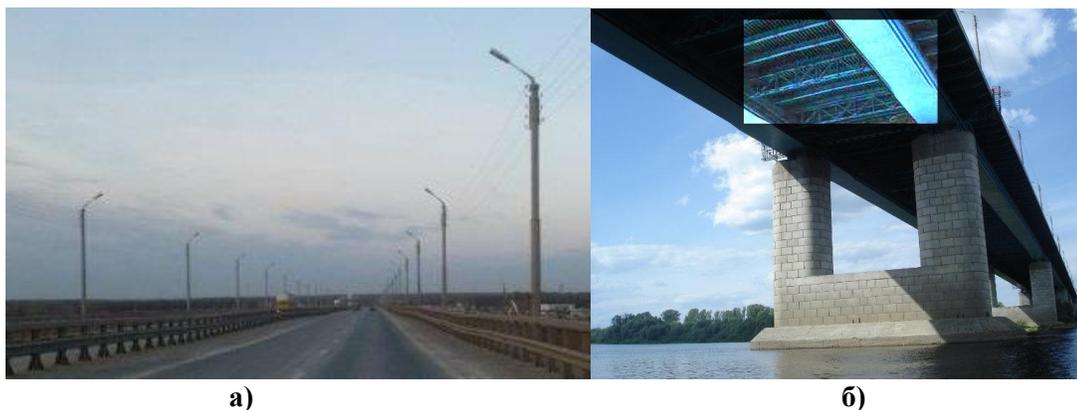


Рис. 4. Стригинский мост через Оку

Зимой (рис. 3, верхний ряд) на этом изображении заметны тёмные провалы — это тень от вертикальных опор моста. Они дают неплохой вклад в линию двойного отражения, при этом не давая отражённому от воды сигналу попасть на нижнюю сторону моста, скрытую за ними. Однако, несмотря на сильное обратное рассеяние, когерентность в этом случае слабая как для льда, так и для воды, за исключением узкой полосы, дающей отражение от боковой поверхности моста.

Теперь, зная механизмы каждого из типов отражений, можно обсудить фазовую картину. На интерферограмме основное (первое) изображение моста даёт видим тёмную полосу, зимой несколько более зашумлённую в соответствии со сниженной когерентностью, осенью более отчётливую, и в обоих случаях с белыми пятнами, маркирующими переход фазы через 2π (рис. 4 справа, окрестности моста на интерферограмме заключены в овалы). Вертикальный профиль фазы вдоль моста на осенней интерферограмме представлен на рис. 5.

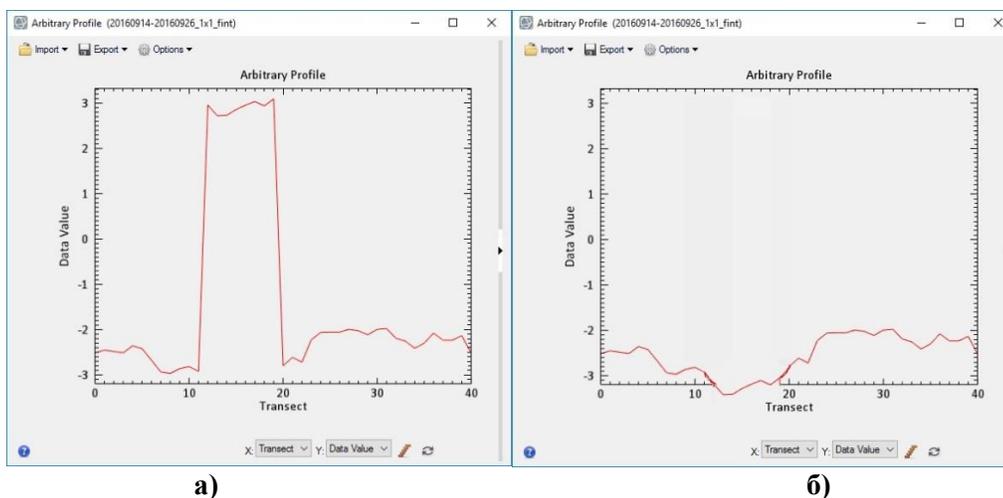


Рис. 5. Профиль фазы вдоль основного изображения Стрингинского моста: а) до развёртки фазы; б) после развёртки фазы

На рис. 5а) можно видеть, что с 7-го по 22-ой элемент профиля имеется небольшой провал в значениях фазы, при этом с 11-ого по 20-ый произошёл «заворот» значений фазы, которая опустились ниже, чем $-\pi$. Процедура развёртки фазы в данном случае состоит в вычитании 2π из «завёрнутых» значений, после чего остаются колебания фазы между значениями -2 и -3.4 рад (рис. 5б)). Интерферометрическая база (её нормальная составляющая) в этой паре равна 24 м, что соответствует перепаду высот 524 м при изменении фазы на 2π . Таким образом, максимальный перепад фазы составляет 1.4 рад, разница между средними значениями на «высоких» и «низком» участках фазового профиля на рис. 5 — менее 1 радиана. Интерпретация этой разности фаз вдоль профиля как перепада высот здесь не годится, поскольку изменение фазы на 1 радиан в данном случае соответствует перепаду высоты на 83 м при движении вдоль моста, что, разумеется не может иметь места. Таким образом, изменение фазы следует интерпретировать как смещение одного фрагмента моста относительно соседних за время между съёмками, и вычисления по формуле (1) дают величину смещения вдоль линии визирования около 4 мм. Среднее значение фазы на «отражении» моста составляет 1.3 радиана, что отражает увеличившийся путь сигнала за счёт нескольких отражений. Следует также отметить фрагмент светлой фазы посередине моста, который в точности соответствует фрагменту с провалом фазы на самом мосту: подвижный участок на отражении смещается в противоположную сторону, и это свидетельствует о смещении фрагмента моста как единой конструкции, поскольку, если бы смещалось только полотно шоссе, на отражении (изображении нижней стороны моста) никаких изменений бы не произошло. Что касается полосы отражения по типу «двугранный уголок», она слишком узкая, и при вычислении фазы за счёт операции усреднения на значения фазы слишком сильно влияют изображения моста, находящиеся слева и справа от неё, поэтому достоверных фазовых измерений на ней провести невозможно.

Романовский мост в Зеленодольске

Для сравнения приведём изображение железнодорожного моста через Волгу в г. Зеленодольск (респ. Татарстан). На рис. 6 показаны амплитудные изображения,

полученные 2 и 14 февраля 2017 г. (слева сверху и слева внизу соответственно), а также разность фаз (справа сверху) и когерентность (справа внизу).

Снова можно отметить многократные отражения. Конструкция моста фермовая, и металлические фермы, состоящие из перекрещенных металлических балок, которые, находясь выше основного полотна моста, дают первую полосу на изображении, смещённую по дальности влево относительно собственно дороги (её можно проследить по северному берегу, где дорога подходит к мосту яркой белой полосой). Далее повторные изображения снова даёт механизм углового отражения и переотражения от поверхности льда нижней стороны моста. Следует отметить, что повышенной когерентностью (яркая белая полоса на карте когерентности, расположенной справа внизу на рис. 6) отличается только первые полосы, на переотражённом изображении когерентность такая же, как на окружающем льду, и, соответственно, фазу измерить на них не представляется возможным. Однако фазовая картина (вверху справа на рис. 6) в данном случае ровная, без колебаний уровня вдоль моста, из чего можно заключить, что мост за период между съёмками 2 и 14 февраля оставался неподвижным.

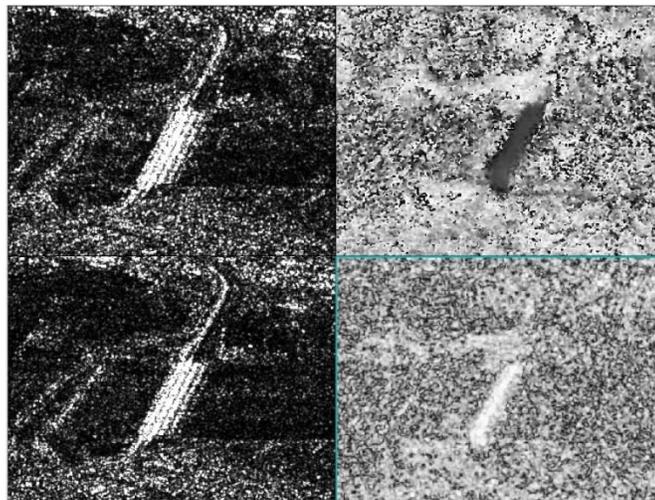


Рис. 6. Железнодорожный мост в Зеленодольске.

**Слева: амплитудные изображения первой (02.02.2017) и второй (14.02.2017) съёмки.
Справа сверху: интерферограмма (разность фаз). Справа внизу: когерентность**

Заключение

Радиолокационная интерферометрия по данным высокого разрешения позволяет вести мониторинг состояния инженерных конструкций мостов, используя особенности синтеза РСА-изображения. Оценка изменений может быть качественная (по карте когерентности — степень декорреляции изображений) и количественная (можно измерить величину смещений по значениям фазы, когда это доступно).

Литература

1. Е.А. Лупян, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Костяной. Ледовая обстановка в районе строительства Крымского моста в феврале 2017 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 247–251.
2. G. Franceschetti, R. Lanari. Synthetic Aperture Radar Processing. CRC Press, 1999. 324 pages.