

Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии

Л. Н. Захарова, А. И. Захаров

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, Московская область, 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

В статье освещена задача дистанционного наблюдения за состоянием мостов по данным космической радиолокационной интерферометрии, которая включает оценку величины смещения моста. Десять мостов, расположенных на территории России и за рубежом, были выбраны в качестве тестовых объектов. На примере обработки данных радара Sentinel-1 показаны случаи сильной декорреляции сигналов, приводящей к невозможности оценить стабильность четырёх мостов за время между съёмками методом интерферометрии. При умеренной и слабой временной декорреляции для мостов разных конструкций (висячей, ферменной, балочной) проведена оценка величины смещений и названы наиболее вероятные причины их происхождения. Отмечена стабильность двух мостов через Волгу; выявлены признаки теплового расширения пролётов моста в Муроме; для висячих мостов через морские проливы в Стамбуле и Сан-Франциско отмечена умеренная динамика механической природы. На примере Стригинского моста через Оку показана возможность фазовых измерений не только на непосредственном изображении моста, но и на дополнительном, которое возникает при кратном переотражении сигнала; отмечена согласованность этих измерений. Приведены результаты обработки данных, полученных в холодное и тёплое время года; указаны особенности измерений в условиях спокойной и взволнованной водной поверхности, её влияние на уровень когерентности сигналов кратных изображений мостов.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, дифференциальная интерферометрия, оценка смещений, мосты

Одобрена к печати: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-42-51

Введение

Мосты являются существенной частью современной инфраструктуры, и регулярная оценка их состояния имеет важное прикладное значение. Возможности дистанционного мониторинга подвижности мостов с помощью радиолокационной дифференциальной интерферометрии в последние годы получают широкое применение (Monserrat et al., 2011; Sousa, Bastos, 2013; Lazecky et al., 2015; Fornaro et al., 2013; Kang et al., 2016). В настоящей работе использованы данные С-диапазона, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой на борту аппарата Sentinel-1A. Интерферометрический метод оценки смещений фрагментов поверхности друг относительно друга основан на измерении разности фаз двух сигналов, полученных в разное время, при условии сохранения отражательных свойств поверхности на интервале между съёмками. При длине волны 5,6 см отражательные свойства естественных земных покровов за 12 дней (период повторения орбиты Sentinel-1) могут сильно измениться, что приводит к полной декорреляции сигналов, однако искусственные сооружения являются относительно стабильными объектами, и вычисление интерферометрической разности фаз для них в этом диапазоне позволяет проводить оценку возможных смещений фрагментов конструкции друг относительно друга с точностью до миллиметров.

Низкая когерентность

Разность фаз $\Delta\varphi$ сигналов первой и второй съёмки в некоторой точке изображения при условии коррелированности сигналов может быть преобразована в величину сдвига d отражающей поверхности вдоль направления распространения сигнала по формуле (Franceschetti, Lanari, 1999):

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

где λ — длина волны, $\Delta\varphi$ — разность фаз. Как видно из формулы (1), величине сдвига на $\lambda/2$ соответствует изменение 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 полном совпадении). При абсолютном значении когерентности менее 0,2 измеренная разность фаз практически случайна и не несёт информации о смещении рассеивающей поверхности.

Несмотря на лучшие показатели стабильности мостов по сравнению с ландшафтным фоном на изображении, потеря когерентности даже при относительно небольшом 12-дневном промежутке между съёмками случается и здесь. Так, из десяти мостов, выбранных для оценки разности фаз, четыре оказались непригодными для анализа смещений методом дифференциальной интерферометрии по причине низкой когерентности: мост через пролив Золотые Ворота в Сан-Франциско, мост Османа Гази через пролив Измит в Турции, вантовый автомобильный мост через Оку в Муроме и технологический мост через Керченский пролив, используемый для строительства основного. В случае муромского и крымского мостов небольшая ширина (15 и 9 м соответственно при разрешении по азимуту 14 м) обуславливает попадание в окно усреднения при вычислении когерентности значительного количества элементов разрешения с сигналом от окружающей поверхности, что катастрофически снижает надёжность фазовых измерений. Помимо небольшой ширины, сниженная когерентность в случае крымского моста обусловлена также его гладкостью, в результате чего основной вклад в обратное рассеяние вносит механизм двукратного отражения от боковой поверхности моста и воды, которая за счёт своей постоянной подвижности делает разность фаз случайной. Попытка отследить динамику моста из-за напора скопившихся ледовых масс, отмеченных в феврале 2017 г. с северной стороны технологического моста (Лупян и др., 2017; Лаврова и др., 2017), выявила невозможность таких измерений (Захарова и др., 2017). Снимки, которые будут получены после установки основных пролётов моста, должны быть более информативными, поскольку на них доминирующим окажется сигнал непосредственного обратного рассеяния от металлоконструкций основного моста.

Подвесные мосты

Полотно висячих мостов не является жёстко закреплённым, а монтируется с помощью подвесных конструкций, сохраняя возможность подвижности. Эта подвижность может быть зафиксирована на интерферограмме, если смещение не настолько сильно, чтобы приводить к декорреляции. Для двух из пяти рассмотренных висячих мостов интерферометрическая обработка дала положительные результаты.

Мост султана Селима Грозного в Турции, называемый также «Третий Босфорский мост», имеет двойное назначение — он автомобильный и железнодорожный, и требования к надёжности его конструкции поэтому повышены: необходимо исключить смещения корпуса моста

ради целостности железнодорожного полотна. Для этих целей конструкция моста предполагает двойной тип подвески: он одновременно вантовый и висячий. На паре изображений, полученных с интервалом 12 дней (3 и 15 марта 2017 г.), прослеживается яркая нитка моста между двумя берегами (рис. 1, сверху). Когерентность вдоль всего дорожного полотна весьма высокая (прямая белая полоса на карте когерентности; рис. 1, внизу слева), практически всюду значение когерентности превышает 0,8, что обеспечивает неслучайную фазу вдоль моста (рис. 1, внизу справа). Профиль значений интерферометрической фазы вдоль моста показан на рис. 2.

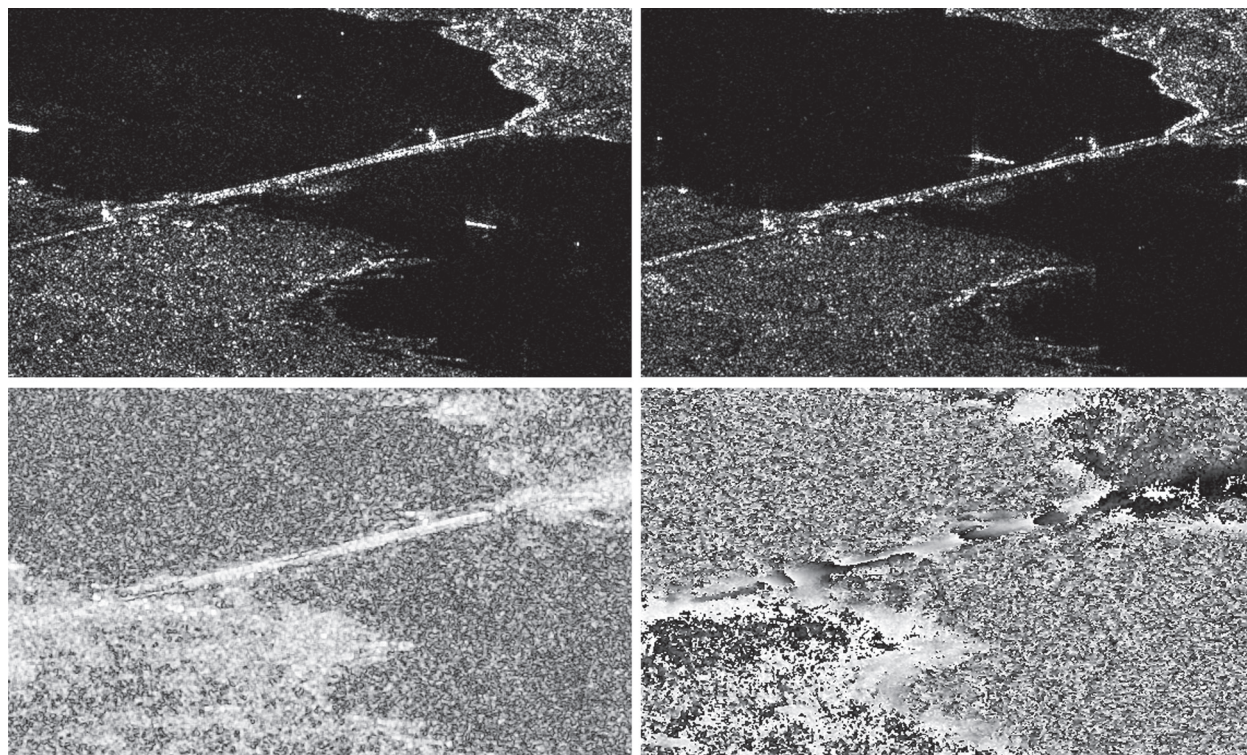


Рис. 1. Фрагменты изображений Третьего Босфорского моста: сверху — амплитуда 03.03.2017 и 15.03.2017; внизу — карта когерентности и интерферограмма



Рис. 2. Профиль фазы вдоль Третьего Босфорского моста для пары 3–15 марта; по горизонтали — номера отсчётов вдоль профиля, по вертикали — фаза в рад

Фаза на *рис. 1* и *2* приведена в «неразвёрнутом» виде, по модулю 2π . После устранения 2π -неоднозначности профиль имеет вид ямы глубиной 4π , на дне которой расположен небольшой «бугорок» высотой около $1,5\pi$ с центром в районе отсчёта 117. Величина базы интерферометра в этой паре — 46 м, что соответствует высоте неоднозначности 330 м, и вариации фазы на 4π за счёт изменения высоты означали бы перепады высоты вдоль моста на 660 м, что неверно. Следовательно, на изображении (см. *рис. 1*) и профиле (см. *рис. 2*) наблюдается смещение полотна моста за время между съёмками. Исходя из симметричности моста и графика фазы на *рис. 2* относительно центральной точки, наиболее вероятным выглядит предположение о том, что смещение происходило вдоль вертикальной оси (например, за счёт различной нагрузки моста в моменты съёмки). Таким образом, центральная часть моста сместилась относительно его краёв на 5 см вверх за 12 дней между 3 и 15 марта 2017 г. (уменьшение фазы соответствует подъёму отражающего объекта при выбранных условиях обработки). Такое незначительное максимальное смещение свидетельствует о надёжности конструкции.

Похожая картина наблюдается для висячего моста, соединяющего города Сан-Франциско и Окленд. Часть его является подвесной: конструкция включает анкерную опору посередине и два одинаковых висячих моста, каждый с двумя мачтами-опорами, слева и справа от неё. Интерферометрическая когерентность вдоль линии моста достаточно высокая: 82% пикселей вдоль профиля имеют значения когерентности $0,75$ и выше, среднее значение когерентности превышает $0,8$. Картина разности фаз за 12 дней между 10 и 22 августа 2016 г. напоминает фазовый график для Третьего Босфорского моста, с той разницей, что вариация несколько больше и составляет около $5,5\pi$ для обеих половин моста; в пересчёте на вертикальные смещения это эквивалентно подъёму центральных частей обоих мостов на $8,2$ см относительно их краёв.

Следует отметить, что протяжённость Третьего Босфорского моста — более 2 км, а каждого из Оклендских — около $1,3$ км. Таким образом, при большей длине измеренная величина максимального смещения для Третьего Босфорского моста меньше, что свидетельствует о его меньшей подвижности, необходимой при двойном автомобильно-железнодорожном назначении.

Ферменные мосты

Романовский железнодорожный мост через Волгу на амплитудном изображении виден как шесть параллельных полос (*рис. 3а, б*). Механизмы рассеяния, ответственные за каждую из полос, детально показаны в статьях (Захарова, Захаров, 2018; Захарова и др., 2017).

На *рис. 3б* можно видеть, что на реке установился лёд, который отражает сигнал несколько лучше, чем вода. Поэтому на ленте реки, проходящей тёмной полосой от левого до края правого фрагмента, на *рис. 3б* видно больше ярких точек, а также на нём заметны две полосы зимней автомобильной переправы у левого края фрагмента.

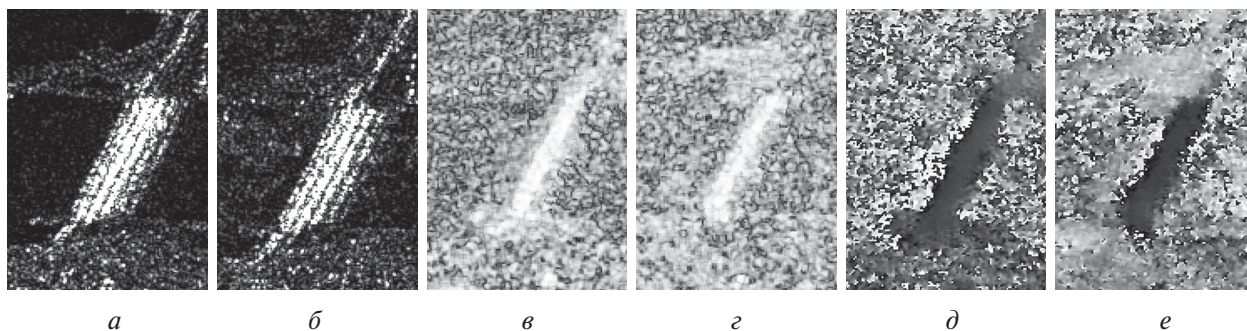


Рис. 3. Результаты обработки двух пар по Романовскому мосту: *а* — амплитудное изображение 11.09.2016; *б* — амплитудное изображение 02.02.2017; *в* — когерентность, осень; *г* — когерентность, зима; *д* — интерферограмма, осень; *е* — интерферограмма, зима



Рис. 4. Профиль осенней фазы вдоль Романовского моста

Интерферометрические измерения свидетельствуют о стабильности Романовского моста на протяжении обоих 12-дневных интервалов.

Аналогичный результат (стабильность в пределах первых миллиметров) получен для автомобильного моста, проходящего по плотине Чебоксарской ГЭС.

Муромский железнодорожный мост состоит из трёх основных пролётов длиной по 250 м, два из которых располагаются непосредственно над руслом реки Оки и один — над поймой. Опоры располагаются посередине каждой фермы, а также на стыках между ними. Обработаны три пары снимков Sentinel-1: 14–26 сентября 2016 г., 12–24 января 2017 г. и 24 января — 5 февраля 2017 г. Интервал между съёмками во всех трёх парах составил 12 дней. Уровень когерентности весьма высок (среднее значение 0,91 осенью и 0,87 зимой при среднеквадратичном отклонении 0,12 в обоих случаях). При этом значения фазы вдоль моста по результатам измерений в осенней паре и зимней отличаются (рис. 5, см. с. 13).

Общее в приведённых двух фазовых профилях — низкий уровень шума на левой, пойменной, части моста по сравнению с правой, расположенной непосредственно над руслом реки. Как уже обсуждалось выше, причина здесь в том, что значения фазы вычисляются в некоторой окрестности центральной точки. Однако имеется и существенное различие на профилях рис. 5: тогда как в осенней паре значения фазы располагаются в полосе от 0 до 1 рад, зимой разброс значений намного больше — от $-1,7$ до $+2,0$ рад. При этом все три пролёта ведут себя одинаково: ближний край пролёта удаляется от точки съёмки, а дальний приближается к ней на величину $1,3$ – $1,6$ рад. Такое поведение вкуче с расположением моста (вытянут вдоль строки изображения) и погодными данными (понижение температуры воздуха между 24 января и 5 февраля от -1 до -12 °С) говорит о том, что наблюдаемая разность фаз произошла в результате температурного сжатия металла. Разница в смещении между концами пролётов составляет в среднем около 3 рад. Преобразование радиан в смещение по горизонтали с учётом длины волны $5,6$ см и угла падения 40° даёт величину сжатия $2,1$ см. Поскольку мост располагается не в точности вдоль строки изображения, а под углом 60° к траектории полёта, реальное уменьшение длины пролёта моста должно составить $2,1 \text{ см} / \sin 60^\circ = 2,4$ см. Длина пролёта составляет около 250 м. Учитывая коэффициент теплового расширения железа $11,3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, можно вычислить, что уменьшение длины пролёта при охлаждении на 11 градусов должно составить 3,1 см. Несоответствие теоретически рассчитанной величины сжатия (3,1 см) и измеренной (2,4 см), вероятно, объясняется разницей между температурой воздуха на метеостанции и температурой металлоконструкций моста в момент съёмки.

Пара изображений, охватывающая предыдущий 12-дневный период, 12–24 января, показывает похожую фазовую картину (рис. 6) с той разницей, что вместо уменьшения от левого края моста к правому значения разности фаз возрастают в диапазоне приблизительно от -3 до 2 рад. Аналогично рассмотренному выше интервалу в период с 24 января по 5 февраля фаза более зашумлена непосредственно над руслом реки. В районе 55–70 пикселей на графике рис. 6 происходит «заворот фазы», и мы видим вместо значений около $-\pi$ значения око-

На картах когерентности (рис. 3в, г) видно, что высокая когерентность соответствует не всем шести полосам, а лишь двум левым, на которые приходится механизм непосредственного обратного рассеяния; правые полосы, включающие двойное и тройное переотражение от двух нитей моста, сильнее декоррелируют. Рисунок 3д, е, а также профиль фазы, показанный на рис. 4, иллюстрируют ровное значение фазы (измерения показывают отклонения в пределах $0,2$ рад от среднего, что при длине волны $5,6$ см соответствует смещению за период между съёмками на величину менее 1 мм в проекции на линию визирования). Таким обра-

ло +л. С учётом этого профиль фазы на первом из трёх пролётов моста похож на два остальных: рост фазы составляет от $-3,1$ до $+0,1$ рад, что в пересчёте на горизонтальные смещения означает увеличение длины пролёта на 2,5 см. Этот результат полностью вписывается в метеорологическую картину: за 12 дней, которые охватывает эта пара дат, в противоположность вышерассмотренной паре дат произошло потепление на 9°C .

Таким образом, обнаруженные смещения не идут с постоянной скоростью, а меняют направление и величину в зависимости от погодных условий, компенсируя друг друга на более длинных интервалах времени, и не влияют на безопасность проезда по мосту.

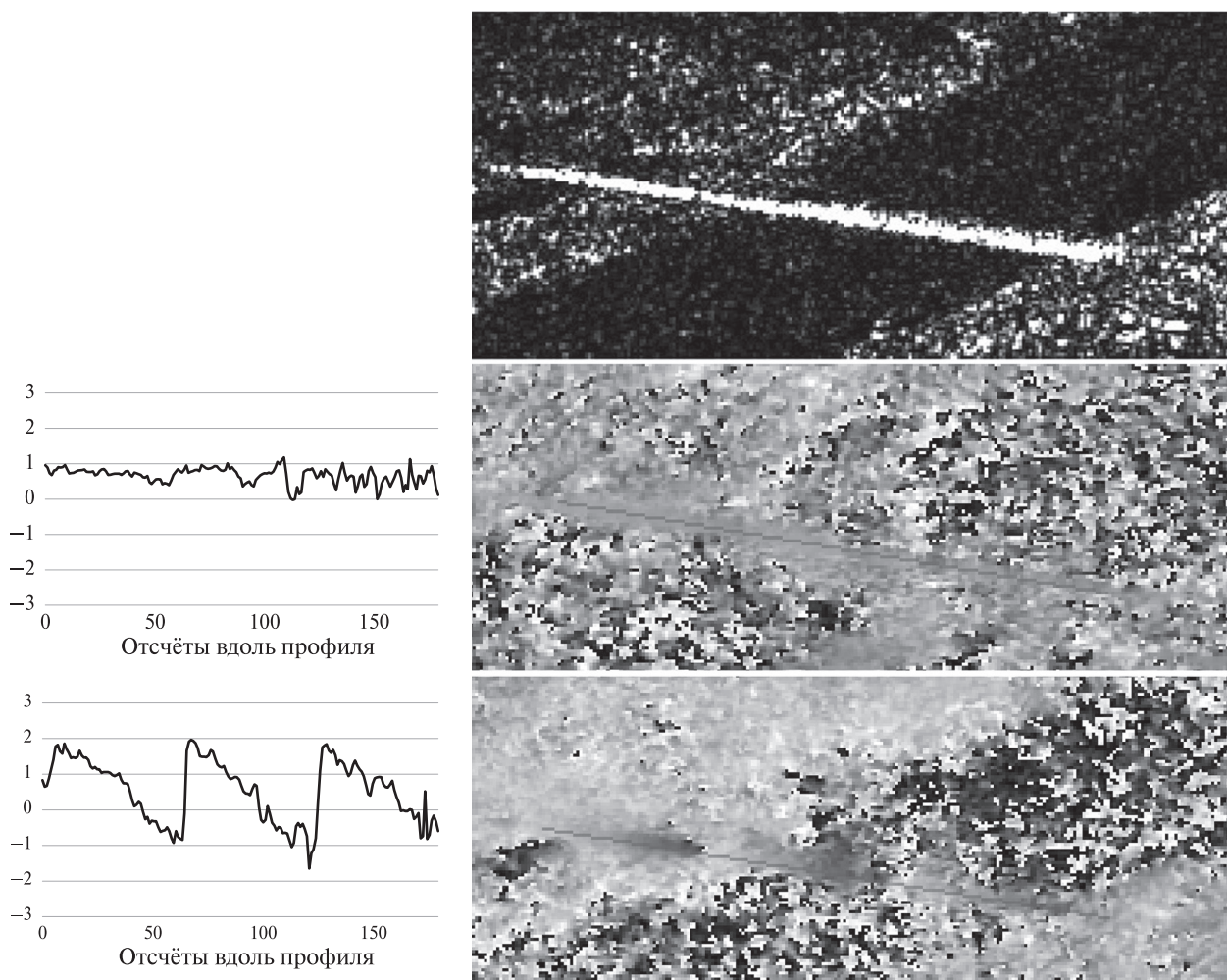


Рис. 5. Фрагмент амплитудного изображения Муромского железнодорожного моста через Оку (вверху) и профили интерферометрической разности фаз (в рад) вдоль моста для пар 14–26 сентября (посередине) и 24 января – 5 февраля (внизу)



Рис. 6. Профиль разности фаз вдоль моста для пары 12–24 января

Особенности фазовой картины моста при переотражении от спокойной воды

Несмотря на обсуждавшееся выше снижение когерентности для кратных переотражений сигнала, существуют условия съёмки, при которых когерентность сигнала на них сохраняется. В качестве примера приведём изображения Стригинского автомобильного моста через р. Оку в Нижегородской области (рис. 7). Истинное положение моста на рис. 7а можно отследить по трём ярким узким линиям; чуть правее идёт полоса двукратного переотражения, ограниченная сверху и снизу берегами реки, а ещё дальше, после тёмного провала, располагается изображение моста, полученное при трёхкратном переотражении сигнала, — оно представлено сплошной яркой широкой полосой. Более подробно механизмы рассеяния рассмотрены в статьях (Захарова, Захаров, 2018; Захарова и др., 2017).

На интерферограмме (рис. 7в) основное изображение моста даёт тёмную полосу с белым пятном посередине, маркирующим переход фазы через 2π . Профиль фазы вдоль моста представлен на рис. 8.

На рис. 8а можно видеть, что в промежутке между 11-м и 20-м отсчётами произошёл «заворот» значений фазы. Профиль фазы после устранения 2π -неоднозначности приведён на рис. 8б. Перепад фазы составляет 1–1,4 рад. Вычисления по формуле (1) дают величину смещения вдоль линии визирования на 6–9 мм соответственно.

Справа от тёмной полосы на интерферограмме (рис. 7в) расположена светлая — на месте, соответствующем изображению нижней стороны моста при трёхкратном переотражении сигнала «вода — мост — вода».

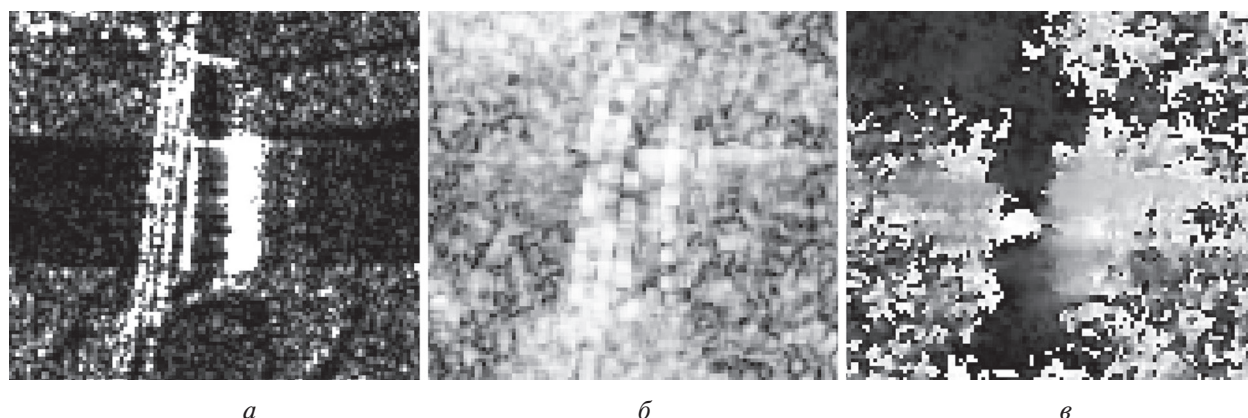


Рис. 7. Результаты интерферометрической обработки пары 14.09.2016–26.09.2016, Стригинский мост через Оку: а — амплитуда; б — когерентность; в — интерферограмма

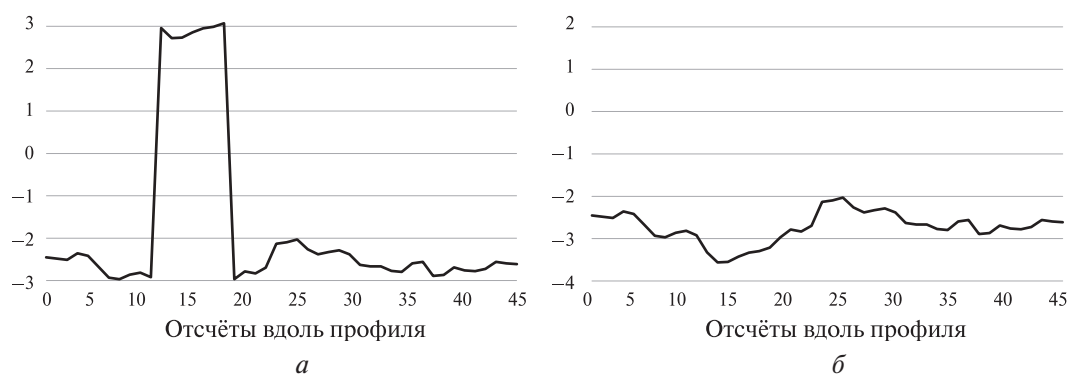


Рис. 8. Профиль фазы вдоль основного изображения Стригинского моста: а — до развёртки фазы; б — после развёртки фазы

На карте когерентности (рис. 7б) среднее значение по этому участку превышает 0,7; таким образом, фаза вполне информативна в отличие от изображений мостов, расположенных над морской поверхностью (там когерентность кратных изображений всюду низкая и фазовое изображение крайне зашумлено). Следовательно, не всегда наличие воды приводит к декорреляции сигнала даже при двукратном отражении от неё. На фоне полосы светлой фазы на рис. 7в имеется ещё более яркое пятнышко, расположение которого в точности соответствует фрагменту с провалом фазы на основном изображении моста. Только здесь средний участок смещается в противоположную сторону (удаляясь от точки съёмки), и это свидетельствует о смещении фрагмента моста как единой конструкции, поскольку если бы смешалось только полотно шоссе, на изображении нижней стороны моста никаких изменений не произошло бы. Величина смещения составляет 1,5–2 рад, что соответствует вертикальному смещению на 9–11 мм. Нижнее значение этой оценки (9 мм) соответствует величине смещения, полученной для верхней стороны моста. Таким образом, фазовые измерения на кратном изображении могут служить дополнительным подтверждением произошедших изменений при условии незначительной, в масштабе длины волны, взволнованности водной поверхности.

Заключение

Несмотря на серьёзные ограничения, связанные с диапазоном (С) и относительно длинным минимальным интервалом между съёмками (12 сут), сочетание которых приводит к сильной временной декорреляции, метод дифференциальной интерферометрии по данным Sentinel-1 оказался пригодным для оценки динамики мостов по орбитальным радиолокационным данным более чем в половине случаев. Два моста оказались стабильными на выбранном интервале, остальные продемонстрировали подвижность, причины которой были проанализированы (тепловое расширение материалов на 2–3 см и нагрузочные смещения висячих мостов в пределах 5–8 см за 12 дней). Для речного моста показана возможность фазовых измерений на изображении, полученном посредством механизма трёхкратного переотражения при условии незначительной взволнованности водной поверхности.

Литература

1. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Сорочинский М. В. Особенности радиолокационных изображений мостов на примере съёмки Sentinel-1 // Материалы Всерос. науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром: Изд.-полигр. центр МИ ВлГУ, 2017. С. 222–228.
2. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Особенности формирования изображений мостов на радиолокационных снимках // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 42–51.
3. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 148–166.
4. Лупян Е. А., Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. 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.
5. Fornaro G., Reale D., Verde S. Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2013. V. 10. No. 4. P. 677–681.
6. Franceschetti G., Lanari R. Synthetic aperture radar processing. CRC Press, 1999. 324 p.
7. Kang J., Wang Y., Körner M., Zhu X. X. Object-based InSAR deformation reconstruction with application to bridge monitoring // Proc. IGARSS-2016. Beijing, China. 2016. P. 6871–6874.
8. Lazecky M., Perissin D., Bakon M., de Sousa J. M., Hlavacova I., Real N. Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations // Proc. 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Lausanne, Switzerland. 2015.

9. Monserrat O., Crosetto M., Cuevas M., Crippa B. The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2011. V. 8. No. 5. P. 864–868.
10. Sousa J. J., Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2013. V. 13. P. 659–667.

Detection of bridges instability by means of SAR interferometry

L. N. Zakharova, A. I. Zakharov

V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

The paper focuses on remote sensing of bridges state, including estimation of displacements by means of radar interferometry technique. Ten bridges located in Russia and abroad were selected as test objects for our study. Results of processing Sentinel-1 radar data showed that there was strong decorrelation on the interferograms of four bridges which precludes the estimation of their stability by means of radar interferometry. Stability level of other six bridges of various types (suspension, truss, and girder ones) with lower temporal decorrelation was estimated and analyzed. It was discovered that two Volga River bridges were stable between observations, railway bridge in Murom demonstrated thermal dilation; two suspension bridges above sea straits near Istanbul and San Francisco showed moderate dynamics of explainable mechanical nature. For the Striginsky bridge over Oka River we discovered the possibility of phase measurements in a “ghost image”, which is an outcome of multi-bounce signal scattering from the bridge and water surface, and the results were in agreement with measurements over a standard single-bounce image of the bridge. We processed data acquired under warm/freeze conditions; also we considered a smooth/waved water surface state under bridges as an influential condition for the high multiple-bounce coherence.

Keywords: synthetic aperture radar, differential interferometry, displacement estimation, bridges

Accepted: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-42-51

References

1. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Sorochinskii M. V., Osobennosti radiolokatsionnykh izobrazhenii mostov na primere s”emki Sentinel-1 (Specificity of radar images of bridges: Sentinel-1 case study), *Materialy Vseross. nauchn. konf. “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii voln”* (Proc. All-Russian Conference “Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Waves Propagation and Diffraction”), Murom: Izd.-poligr. tsentr MI VIGU, 2017, pp. 222–228.
2. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Osobennosti formirovaniya izobrazheniy mostov na radiolokatsionnykh snimkah (Specificity of bridges appearance on radar images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 42–51.
3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ledovaya obstanovka v Kerchenskom prolive v tekushchem stoletii. Retrospektivnyy analiz na osnove sputnikovykh dannykh (Ice conditions in the Kerch Strait in the current century. A retrospective analysis based on satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 148–166.
4. Loupian E. A., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., Ledovaya obstanovka v raione stroitel’sтва Krymskogo mosta v fevrale 2017 g. (Ice conditions in the construction area of the Crimean Bridge in February 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 247–251.
5. Fornaro G., Reale D., Verde S., Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 677–681.

6. Franceschetti G., Lanari R., *Synthetic Aperture Radar Processing*, CRC Press, 1999, 324 p.
7. Kang J., Wang Y., Körner M., Zhu X. X., Object-based InSAR deformation reconstruction with application to bridge monitoring, *Proc. of IGARSS-2016*, Beijing, China, 2016, pp. 6871–6874.
8. Lazecky M., Perissin D., Bakon M., de Sousa J. M., Hlavacova I., Real N., Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations, *Proc. 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Lausanne, Switzerland, 2015.
9. Monserrat O., Crosetto M., Cuevas M., Crippa B., The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations), *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2011, Vol. 8, No. 5, pp. 864–868.
10. Sousa J. J., Bastos L., Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2013, Vol. 13, pp. 659–667.