

Мониторинг состояния Муромского железнодорожного моста через Оку в 2017-2018 гг. по интерферометрическим данным Sentinel-1A

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

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

В работе представлен анализ изображений, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой на борту космического аппарата Sentinel-1A, проведённый с целью оценки стабильности железнодорожного моста через р. Оку в г. Муром. Проведены оценки разности фаз и когерентности для анализа смещений на интервалах 12 дней, а также 11-13 месяцев. На материале пар изображений с интервалом 12 дней показана зависимость результатов измерений от геометрического расположения моста в кадре, а также от погодных условий: температуры, облачности, скорости ветра. Сделан вывод о стабильности моста: максимальные зафиксированные относительные смещения на годичных интервалах в 2016-2018 гг. составили менее 1 см.

The paper aims at interferometric analysis of pairs of Sentinel-1 SAR images in order to estimate the state of the Murom railway bridge over the Oka river. Interferograms and coherency images are presented for 12-days and 1-year time intervals. Analysis of 12-days pairs demonstrates the influence of observation geometry and weather conditions (air temperature, nebulosity, wind speed) on the interferometric measurements. The resulting estimation of the bridge's dynamics shows its stability: the estimated relative displacement rate is under 1 cm.

Введение

Мосты являются неотъемлемой частью современной транспортной инфраструктуры, и отслеживание их стабильности, а также выявление нежелательной подвижности в случае её возникновения представляются важной задачей дистанционного зондирования Земли из космоса. Интерферометрическая съёмка с повторяющихся орбит является удобным инструментом для оценки величины подвижек различного характера, включая землетрясения [1], оползни [2], движение ледников [3], опускание грунта вследствие различных причин [4,5].

В процессе интерферометрической обработки 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

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

где λ — длина волны,

$\Delta\varphi$ — разность фаз [6].

Как видно из формулы (1), величине сдвига на $\lambda/2$ соответствует изменению разности фаз на период 2π . Прежде чем вычислять сдвиги поверхности, следует оценить величину интерферометрической когерентности, показывающую степень декорреляции сигналов z_1 и z_2 , полученных при первой и второй съёмке, соответственно:

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

($|\gamma|=0$ 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.

Влияние погодных условий на оценку стабильности Муромского железнодорожного моста

Муромский железнодорожный мост, соединяющий западный и восточный берега реки Оки, был построен в 1912 году. В конце 1970-х была проложена вторая ветка моста, в 2001-2004 была проведена замена мостовых пролётов. Общая длина моста составляет 844 м, он состоит из шести основных пролётов длиной по 127 м. Пролётные строения (фермы) соединены попарно в верхней части дополнительными продольными балками, поэтому условно можно ферменные конструкции моста считать состоящими из трёх независимых частей. Одна из этих частей располагается над поймой реки Оки, две остальных — непосредственно над руслом.

В течение всего 2017 и первого квартала 2018 года радиолокатором С-диапазона Sentinel-1A регулярно проводились съёмки с захватом территории Мурома. Периодичность составила 12 дней. Для оценки подвижности моста были построены интерферограммы с 12-дневным интервалом для 30 пар изображений 2017-2018 годов, и дополнительно ещё одна интерферограмма по данным, полученным осенью 2016 года. Кроме этого, построены интерферограммы с более длительными интервалами между съёмками: по одной для интервалов в 2, 3, 6 месяцев, а также пять интерферограмм с годичной разницей между моментами съёмки.

Расположение изображения моста в кадре таково, что он идёт почти вдоль строки изображения: противоположные края моста отстоят друг от друга на 180 пикселей по наклонной дальности и на 25 по азимуту. При наличии под мостом гладкой поверхности (воды, льда) на радиолокационном изображении появляется второе изображение на чуть большей дальности, соответствующей задержке сигнала, отражающегося от элементов конструкции моста вниз к воде и затем зеркально обратно. Более подробно о механизмы отражения искусственных объектов над водой обсуждены в [7]. В случае расположения моста вдоль траектории носителя полученные при помощи различных механизмов рассеяния изображения моста отстоят друг от друга на некоторое расстояние, зависящее от высоты моста над водой, угла обзора и разрешения радиолокатора по наклонной дальности. В случае Муромского железнодорожного моста на изображениях Sentinel-1A мост расположен не поперёк строк, а почти строго вдоль них. В таком слегка наклонном варианте изображение, располагающееся на несколько пикселей правее основного, может находиться в непосредственной близости от него или даже отчасти накладываться, что можно видеть на двух амплитудных изображениях (рис. 1, внизу): над чёрной лентой реки яркая полоса сильно отражающего моста имеет ширину 5-6 пикселей по азимуту (по вертикали), тогда как над пойменной частью его ширина составляет 3-4 пикселя. Следует также отметить, что второе изображение, полученное при помощи механизма двойного переотражения по типу двугранного угла, за счёт переотражения сигнала водой, поверхность которой постоянно меняет микрорельеф, при построении интерферограммы по паре, снятой с повторяющихся орбит, теряет когерентность (рис. 1, правый график). По этой причине интерферограмма в надводной части моста заметно более зашумлённая (рис. 1, левый график).

На трёх десятках интерферограмм, полученных с 12-дневным интервалом между съёмками, в одних случаях ход фазы вдоль моста отсутствует, в других имеются признаки смещений на первые сантиметры, которые можно отнести за счёт теплового расширения металла в зависимости от погодных условий [8] Таким образом, чтобы исключить влияние перепада температур, для долговременного мониторинга следует выбирать сцены, снятые в приблизительно одинаковых погодных условиях. В таблице 1 отмечены температура воздуха, скорость ветра и облачность на момент съёмки для 38 включённых в рассмотрение сцен.

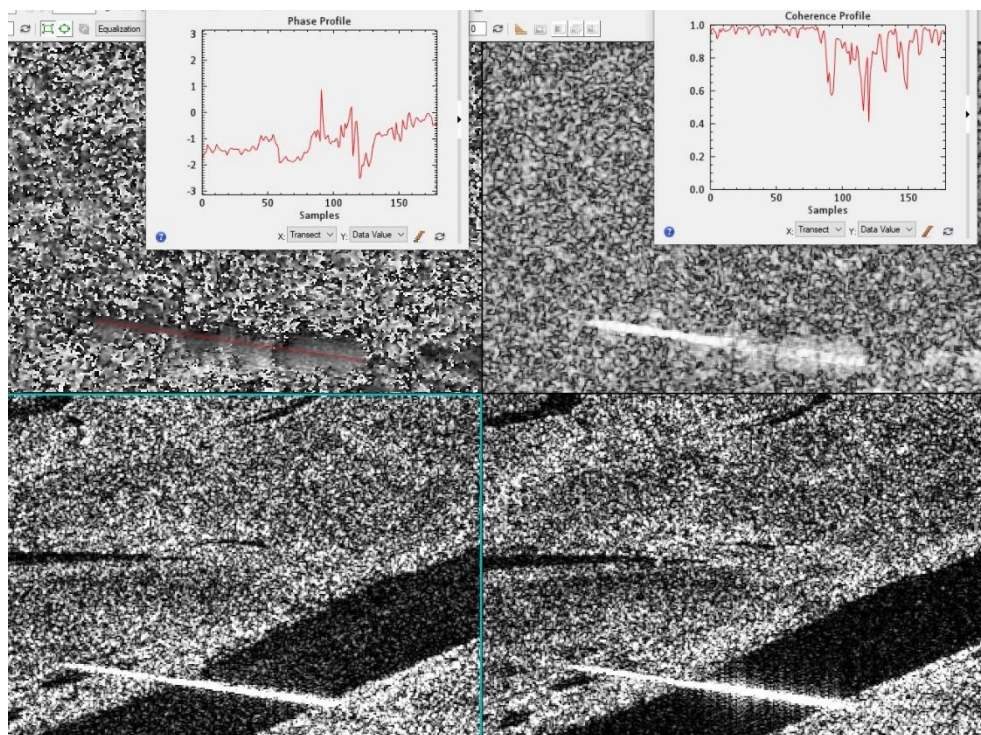


Рис. 1. Результаты обработки пары 20170711-20170723:

Слева сверху: интерферограмма (фаза), красный отрезок указывает положение профиля
Справа сверху: -когерентность (график приведён для того же профиля)
Внизу: амплитудное изображение для первой и второй съёмки пары.

Ветер влияет на взволнованность водной поверхности и, как следствие, на изображения моста, получаемые при отражении сигнала от воды. Максимальная скорость ветра для приведённых 38 дат согласно наблюдениям была 14 сентября 2016 года. Сравнение изображений моста от 14 сентября 2016 г. (ветер 4 м/с) и 23 июля 2017 г. (штиль) показывает, что в ветреную дату изображение моста, полученное при помощи отражения от воды, не такое сплошное, как в спокойную погоду (рис. 2). Отражённое изображение моста находится только над водой, в правой части рис. 2. Короткий красный отрезок показывает верхнюю границу отражённого изображения, а нижней границей оно прилегает к главному изображению моста (сплошной белой полосе, заключённой между двумя длинными красными отрезками). Зашумлённое отражение моста, находящееся в непосредственном соседстве с главным изображением при фильтрации в скользящем окне будет нарушать фазовую картину.

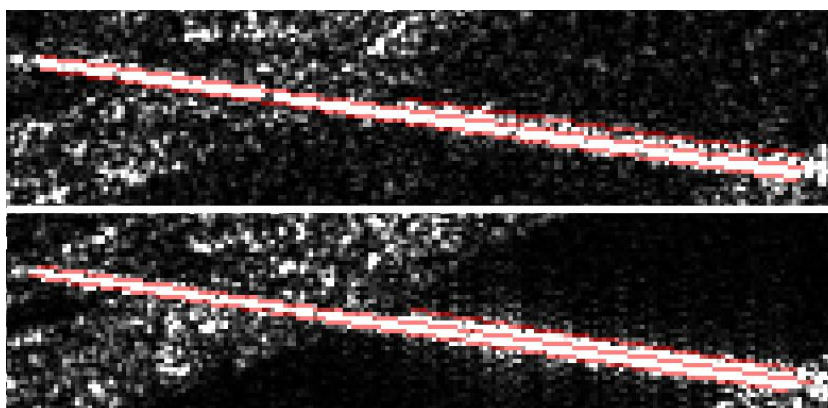


Рис. 2. Изображение моста в ветреную погоду (вверху) и в штиль (внизу).

Таблица 1. Погодные данные в дни съёмки согласно ресурсу гр5.ru.

№ п/п	Дата, ггггммдд	Темп., °С	Облачность, %	Ветер, м/с	№ п/п	Дата, ггггммдд	Темп., °С	Облачность, %	Ветер, м/с
1	20160914	9	100	4	20	20170909	10	90	3
2	20160926	8	100	3	21	20170921	6	80	0.3
3	20170112	-10	100	2	22	20171003	2	100	1
4	20170124	-1	95	3	23	20171015	7	100	2
5	20170205	-12	100	2	24	20171027	-2	100	3
6	20170217	-14	20	3	25	20171108	-1	10	2
7	20170301	1	80	3	26	20171120	2	100	2
8	20170418	-3	20	2	27	20171202	-3	100	4
9	20170430	13	10	2	28	20171214	0	100	1
10	20170512	3	100	3	29	20171226	-10	20	2
11	20170524	13	70	1	30	20180107	0	99	2
12	20170605	7	10	1	31	20180119	-12	10	3
13	20170617	13	100	3	32	20180131	-5	100	3
14	20170629	11	40	1	33	20180212	-13	10	2
15	20170711	12	20	3	34	20180224	-25	0	0
16	20170723	14	20	0	35	20180308	-15	0	3
17	20170804	15	80	1	36	20180320	-15	0	2
18	20170816	15	0	1	37	20180401	0	100	1
19	20170828	10	100	0.2	38	20180413	0	99	1

Влияние заметных температурных перепадов (на 10-11°С) на интерферометрическую картину при зимних съёмках было описано в [8]. Анализ длинного временного ряда изображений моста показал, что и меньшая разница в температурах сказывается на разности фаз. На рис. 3 приведён профиль моста, построенный по интерферометрической паре 21 сентября – 3 октября 2017 г (температура +6°С и +2°С, соответственно). Правая часть профиля (начиная от отсчёта 80) сильно зашумлена, однако первый из трёх фрагментов моста, находящийся над сушей, и часть второго, демонстрируют явное убывание фазы. Перепад фазы между левым и правым краем первой трети моста составляет 1.4 рад, что соответствует укорачиванию этого фрагмента моста на 11 мм.

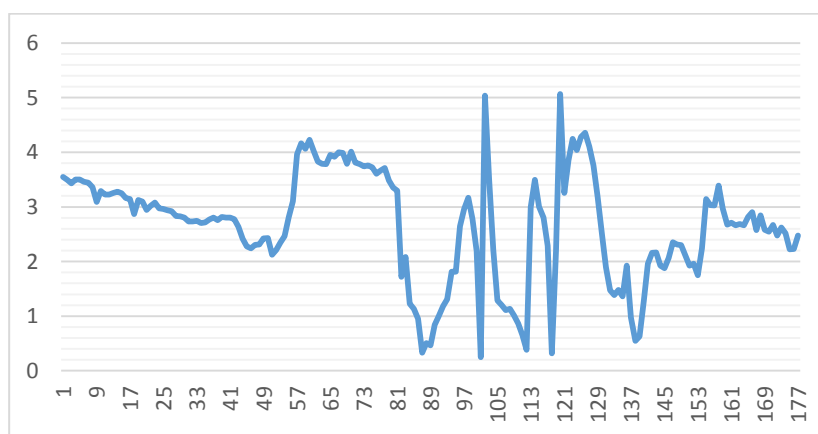


Рис. 3. Профиль разности фаз вдоль моста для пары 20170921-20171003.

Несмотря на то, что облака являются радиопрозрачными, и это одно из значительных преимуществ радиолокационного наблюдения перед оптическим, в ряде случаев облачность следует учитывать при интерпретации радиолокационных изображений и результатов их обработки. Для иллюстрации влияния облачности рассмотрим пару изображений 5-17 февраля 2017 года. Разница в температуре на момент съёмки (6:30 утра местного времени в обе даты) составляет 2°C. Значения разности фаз вдоль моста для этой пары приведены на рис. 4. Величина разности фаз от края до края фрагмента составляет 2 рад для первой трети моста, наименее зашумлённой на интерферограмме. Это больше, чем на рис. 3, где перепад температур за время между съёмками был вдвое большим! Кроме того, следует отметить, что в [8] перепаду температур в 9-11 градусов соответствовала разность фаз 2.6-3.2 рад. Разности температур в пять раз меньшей (2°C в паре 5-17 февраля 2017 г.) должен был бы соответствовать перепад фаз также в пять раз меньший (тепловое расширение металлов линейно зависит от температуры), однако мы видим, что он лишь незначительно меньше. Следовательно, кроме температуры воздуха, при анализе пары 5-17 февраля 2017 г. следует принимать в рассмотрение радиационное охлаждение поверхности земли (и моста) в безоблачную зимнюю ночь. Действительно, хотя на момент съёмки в 6:30 утра 17 февраля 2017 г. интерполяция даёт облачность около 20%, однако с 21 часа предыдущих суток и до 6 утра погода небо было ясным, в результате чего поверхность моста за счёт теплового излучения могла охладиться заметно сильнее, чем воздух на метеостанции. В ночь же на 5 февраля небо было полностью покрыто облаками. Таким образом, отклонения фазовой картины, которую мы наблюдаем на рис. 4, от ожидаемой, объясняются различиями в облачном покрове в ночи, предшествующие съёмкам. В летнее время облачность следует также учитывать, поскольку прямой нагрев моста лучами солнца может исказить картину аналогичным образом. Однако в нашем случае свидетельств такого нагрева обнаружено не было, поскольку при местном времени съёмки в 6:30 утра даже в дни летнего солнцестояния от момента рассвета до съёмки проходит не более 3 часов. Кроме того, в утренние часы препятствием для прямого нагрева может служить туман, поднимающийся от реки.

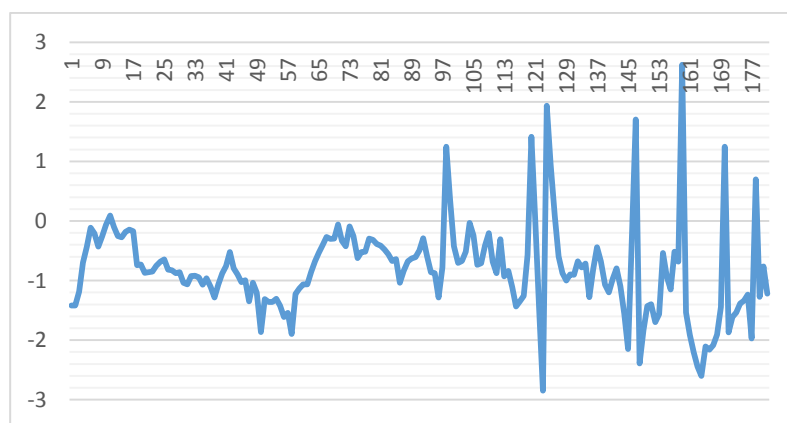


Рис. 4. Профиль разности фаз вдоль моста для пары 20170205-20170217.

Анализ пар с годичным интервалом между съёмками для оценки стабильности моста

В связи с вышеизложенной зависимостью от погодных условий для построения долговременных интерферограмм были выбраны даты, в которые наблюдались близкие значения температуры воздуха и облачности.

В паре 14 сентября 2016 г. – 28 августа 2017 г. температура воздуха отличалась на 1°C, облачность составила 100%. Профиль разности фаз и изображения показаны на рис. 5.

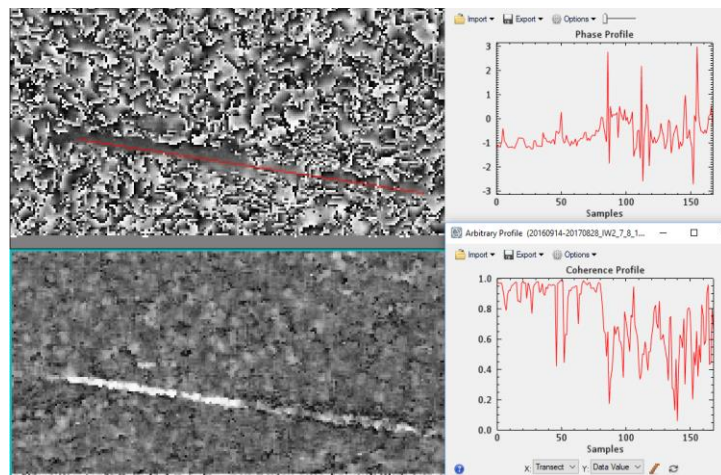


Рис. 5. Интерферограмма (вверху) и карта когерентности (внизу) для пары с годичным интервалом 20160914-20170828.

На графике когерентности (рис. 5, внизу) видно падение когерентности между отсчётами 80 и 90, что на карте когерентности проявляется уменьшением яркости правой части моста по сравнению с левой, и с того же места интерферограмма сильно искажена выбросами значений фазы в обе стороны (рис. 5, вверху). На рис. 6 приведены разность фаз для каждого из трёх фрагментов моста в отдельности вместе с её линейным приближением, построенным по методу наименьших квадратов. Максимальный наклон линия приближения имеет во втором фрагменте, внутри которого начинается соседство основного и отражённого изображений, за счёт чего падает когерентность и увеличивается уровень фазового шума. Разность фаз на линии приближения от края до края первого и третьего фрагмента составляет 0.4 рад и 0.7 рад, соответственно. Небольшой рост фазы, заметный на всех трёх фрагментах, объясняется разницей температур в дни наблюдения в один градус (+9°C было 14 сентября 2016 г. и +10°C 28 августа 2017 г.)

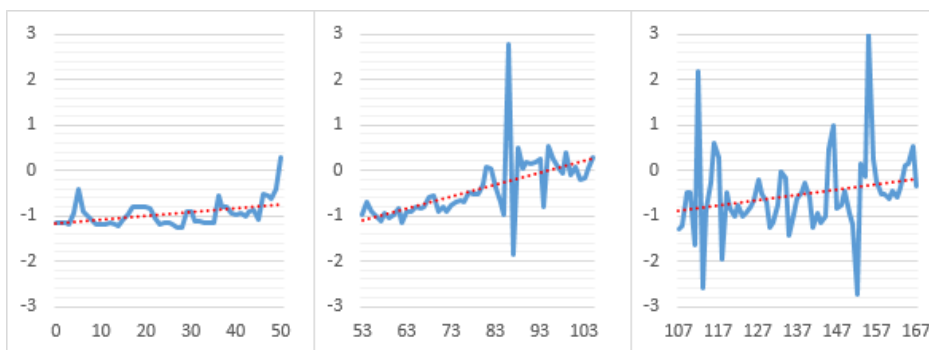


Рис. 6. Линейное приближение фазы на фрагментах моста в паре 20160914-20170828.

В следующей паре временной интервал между съёмками более чем на 90% перекрывается с предыдущей: первая съёмка произошла 26 сентября 2016 г., а вторая 15 октября 2017 г. На рис. 7 мы видим небольшой ход фазы в противоположную сторону по сравнению с рис. 6. Погодные данные свидетельствуют о разнице температур также в один градус, однако с противоположным знаком: в паре на рис. 5 и

6 между первой и второй съёмка температура увеличилась, а в паре на рис. 7 снизилась от $+8^{\circ}\text{C}$ до $+7^{\circ}\text{C}$. Снова максимальную разницу хода фазы показывает линейное приближение на втором фрагменте моста (1.1 рад), в первом фрагменте разницы 0.9 рад, в третьем 0.4 рад.

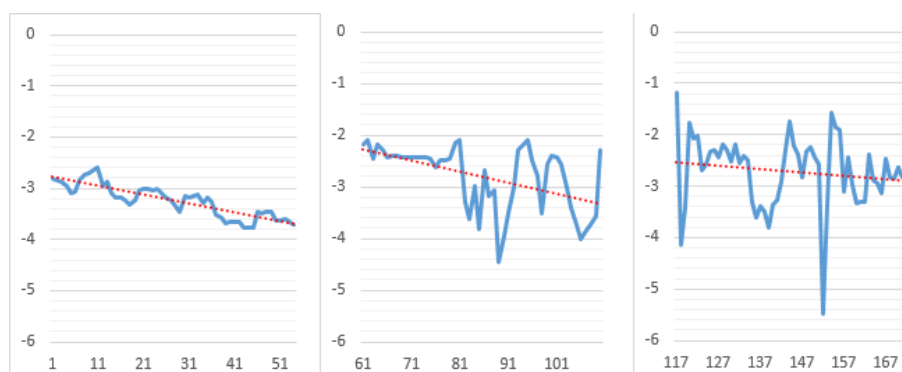


Рис. 7. Линейное приближение фазы на фрагментах моста в паре 20160926-20171015.

Как видно из рис. 6 и 7, самыми надёжными имеет смысл считать измерения на первом фрагменте, наименее подверженном шуму. Для остальных долговременных пар будут приведены профили фазы только для этого фрагмента. На рис. 8 показаны графики разности фаз и её линейного приближения ещё трёх пар. В двух зимних парах имеется небольшой ход фазы в противоположных направлениях в соответствии с температурными измерениями в дни съёмки: в паре 20170112-20180119 температура изменялась от -10°C до -12°C , в паре 20170217-20180212 — от -14°C до -13°C . В весенней паре с интервалом 13 месяцев 20170301-20180401 температура менялась менее, чем на 1°C : от $+1^{\circ}\text{C}$ до $+0.3^{\circ}\text{C}$, и линия тренда почти горизонтальна, что показывает стабильность этого фрагмента моста на интервале между съёмками.

В паре 20170217-20180212 значение базы интерферометра выше, чем у других пар: оно составляет 103 м, из-за чего эта интерферограмма более чувствительна к перепадам высот рассеивающей поверхности. Поскольку в местах соединения фрагментов высота фермы моста уменьшается (рис. 9, места соединения заключены в круги), здесь может наблюдаться изменение фазы на величину до 0.4 радиан, соответствующее изменению высоты на 10 м (приблизительная высота фермы). Таким образом, измерения на краях фрагмента могут исказить фазовую картину в случае относительно больших величин базы интерферометра.

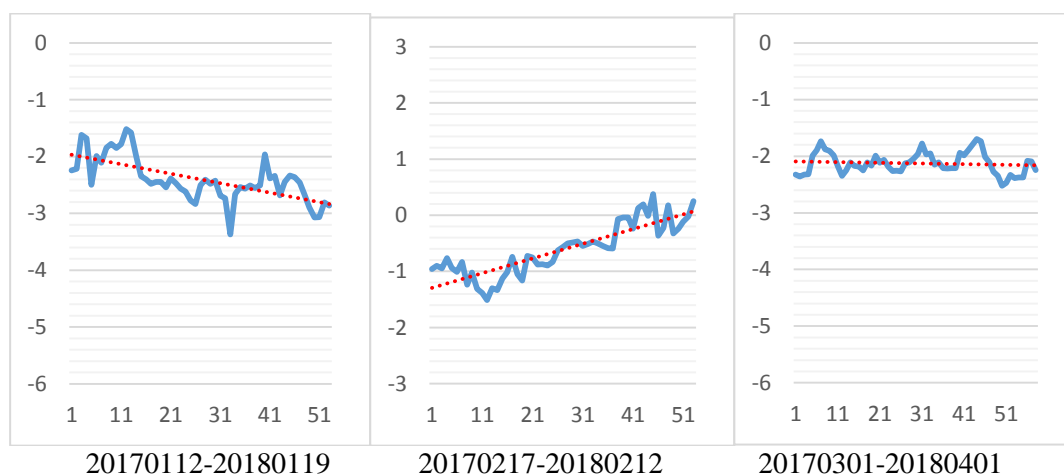


Рис. 8. Линейное приближение хода фазы для первого фрагмента моста в парах с годичным интервалом между съёмками.



Рис. 9. Вид на мост с реки.

Во всех случаях долговременных интерферограмм линейное приближение хода фазы остаётся в пределах 1 радиана, за исключением пары 20170217-20180212, где разница между левым и правым краем фрагмента достигает 1.4 рад. Смещение, соответствующее 1.4 радиан, составляет для Sentinel-1A 6 мм в направлении на спутник. Таким образом, можно заключить, что во всех рассмотренных парах величина смещения за год не превышает 1 см.

Заключение

В статье рассмотрены условия, влияющие на интерферометрические измерения смещений искусственных объектов на примере железнодорожного моста через Оку в Муроме. К ним относится расположение моста в кадре радиолокационного изображения, а также погодные условия в момент съёмки и в предшествующие часы. К наиболее значительным изменениям на интерферограмме приводят температурные колебания в моменты съёмки. Анализ интерферометрических пар с интервалом между съёмками 11-13 месяцев показал высокую стабильность фрагмента моста, расположенного над поймой реки: возможные величины смещения не превышают 1 см по вертикали от края до края моста.

Литература

1. D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, T. Rabaute. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*. Vol. 364, pp. 138–142 (08 July 1993).
2. V.H.Singhroy, J.E. Loehr and A.C. Correa. Landslide Risk Assessment with High Spatial Resolution RemoteSensing Satellite Data. *Proc. of IGARSS 2000*, July 24-28, Honolulu, USA. Vol. 6. P. 2501 – 2503
3. Goldstein, R.M., et al. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an antarctic ice stream // *Science*. — 1993. — Vol. 262. — P. 1525—1530.
4. T. Strozzi, U. Wegmüller, C. Werner and A. Wiesmann. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy. *Proc. of IGARSS 2000*, July 24-28, Honolulu, USA. Vol. 5. P. 2239 – 2241.
5. U. Wegmüller, T. Strozzi, G. Bitelli. Validation of ERS Differential SAR Interferometry for Land Subsidence Mapping: the Bologna Case Study. *Proc. of IGARSS 1999*, 28 June - 2 July 1999, Hamburg, Germany. Vol. 2. P. 1131 - 1133.
6. Franceschetti G., Lanari R., *Synthetic Aperture Radar Processing*, CRC Press, 1999, 324 p.
7. Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, Особенности формирования изображений мостов на радиолокационных снимках // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 15. №1. с. 42-51. 2018.
8. Л.Н. Захарова, А.И. Захаров. Обнаружение динамики мостов методом радиолокационной интерферометрии. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. в печати.