

Особенности формирования изображений мостов на радиолокационных снимках

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 работе рассмотрены механизмы формирования изображений мостов на радиолокационных изображениях высокого разрешения. Приведены схемы распространения и переотражения сигнала в рамках геометрической оптики и на примере данных радиолокатора, работающего на борту космического аппарата Sentinel-1A, показаны реализации этих схем на практике. Три рассмотренных моста имеют различные типы конструкции (висячие и ферменный), среди них есть автомобильные и железнодорожный, они расположены на разной высоте над поверхностью; кроме того, выбраны дни съёмки в различные сезоны года с разным состоянием водной поверхности под мостами. Детально проанализированы различные аспекты наложения изображений в зависимости от особенностей элементов мостовой конструкции и геометрии съёмки. Показано, что при формировании изображений мостов главными являются три механизма рассеяния: непосредственное отражение от элементов конструкции моста, двукратное отражение по типу двугранного углового отражателя и трёхкратное отражение с двойным участием поверхности воды (льда). Для моста, расположенного в умеренном климатическом поясе, проведено сравнение переотражения сигнала от воды и ото льда при формировании кратных изображений. Обозначены условия, при которых появляются отражения большей кратности.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), радиолокационное изображение, мосты, кратные переотражения, геометрическая оптика, механизмы рассеяния

Одобрена к печати: 31.12.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-42-51

Введение

Современные методы дистанционного зондирования позволяют осуществлять мониторинг состояния различных технических сооружений при помощи анализа снимков Земли из космоса. Для искусственных сооружений радиодиапазон является предпочтительным, поскольку, как правило, они являются яркими объектами на радиолокационных изображениях по сравнению с окружающим естественным фоном.

В ряду других искусственных объектов мосты, являясь частью транспортной инфраструктуры, требуют внимательного отношения к их состоянию. Интерферометрическая радиолокационная съёмка с повторяющихся орбит носителя позволяет обеспечить регулярное наблюдение за состоянием мостов (Cusson et al., 2012; Sousa et al., 2014). Так, ретроспективный анализ 52 снимков моста в Португалии обнаружил явные признаки угрожающей подвижности перед его катастрофическим обрушением (Sousa, Bastos, 2013).

Для корректного анализа радарного снимка необходимо понимать механизмы рассеяния, отвечающие за формирование изображения объекта. Особенно это важно для изображений высокого разрешения, на которых фиксируется обратное рассеяние от различных деталей объекта (в случае моста это опоры, подвеска, полотно, пролётные конструкции и т.д.), при этом могут возникать кратные переотражения от соседних деталей и/или поверхности земли, воды или льда, над которыми расположен объект.

Кратные переотражения от мостов упомянуты в статьях (Lee, Pottier, 2009; Lee et al., 2006) в связи с их поляризационными свойствами, а также предложена схема их образования на примере одного подвесного моста. В настоящей статье рассмотрены мосты различных конструкций (висячей, ферменной) и назначения (автомобильные и железнодорожный),

расположенные на разной высоте над поверхностью, в тёплые и морозные дни съёмки, обуславливающие вид поверхности под ними (вода или лёд). Детально проанализирована зависимость возникновения кратных отражений от особенностей конструкции нижней части моста, обращённой к воде. Рассмотрен также случай наложения изображений различной кратности друг на друга.

Мост «Золотые ворота» в Сан-Франциско

Висячий мост «Золотые ворота», открытый в 1937 г., в длину насчитывает 2737 м при ширине 28 м, удерживается подвесной конструкцией с двумя опорами, возвышающимися на 227 м над водой. На *рис. 1* показано радиолокационное изображение этого моста, полученное 10 августа 2016 г. аппаратом Sentinel-1A.

На *рис. 1* видны три яркие полосы, соединяющие берега пролива, тогда как в действительности мост только один. Проследим детали механизмов рассеяния, приводящие к возникновению кратных изображений моста, для чего рассмотрим увеличенный фрагмент этого изображения (*рис. 2*).

Непосредственное изображение моста, полученное при обратном рассеянии сигнала элементами его конструкции, очерчено на *рис. 2* оранжевым контуром. Следует отметить некоторую изогнутость этого изображения: средняя часть расположена чуть левее, чем концы моста. Причина изгиба изображения в том, что середина моста дугообразно приподнята над краями, и, таким образом, расположена ближе к радару, следовательно наклонная дальность до неё меньше, чем до краёв моста.



Рис. 1. Фрагмент с изображением моста «Золотые ворота» (Sentinel-1A, 10.08.2016)

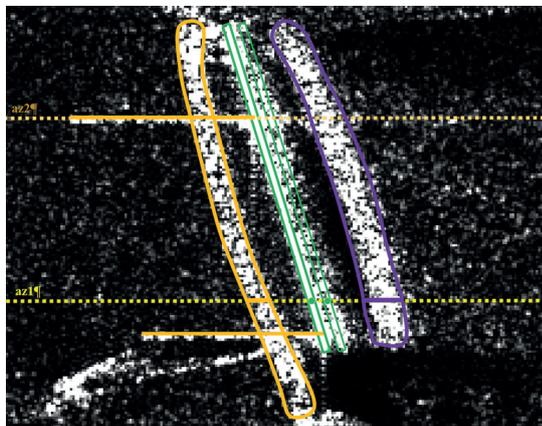


Рис. 2. Увеличенный фрагмент изображения от 10.08.2016

Следующая яркая полоса на *рис. 2* совершенно прямая, она отмечена зелёным узким контуром. На *рис. 3* схематично показан механизм её формирования: сигнал отражается зеркально от боковой поверхности моста и затем зеркально же от поверхности воды, как от граней прямоугольного двугранного углака. На какой бы высоте над поверхностью воды ни произошло первое отражение, оптический путь сигнала оказывается равным пути сигнала, отражённого от точки, в которой грани углового отражателя сходятся. Разница в наклонной дальности между этой точкой и ближним к радиолокатору краем моста Δx (см. *рис. 3*) вычисляется по формуле:

$$\Delta x = h \cos \theta,$$

где h — высота моста над водой; θ — угол обзора. В случае моста «Золотые ворота» $h = 67$ м, угол обзора в средней полосе режима широкополосной интерферометрической съёмки Sentinel-1A составляет около 39° , что даёт $\Delta x = 52$ м. При расстоянии между центрами пикселей 2,3 м это соответствует 23 пикселям — приблизительно таково расстояние между оранжевым и зелёным контурами на *рис. 2*.

Чуть правее яркой полосы двукратного отражения на *рис. 2* расположена ещё одна, несколько менее яркая, а в центре моста и вовсе пропадающая. Эта полоса отмечена вторым зелёным контуром. Её происхождение следующее: это такое же отражение по типу двугранного углака, но образовано оно элементами подвески, расположенными над дальней от радиолокатора стороной моста. Тот факт, что эта вторая линия хорошо прослеживается с обеих сторон от опор, а посередине моста исчезает, объясняется тем, что для низко висящего троса сигнал, отражённый от него зеркально вниз, попадает на поверхность моста, а не на воду, и либо рассеивается в сторону, либо часть его всё же достигает приёмной антенны радиолокатора, однако за более короткое время, чем луч, отразившийся бы от поверхности воды в отсутствие преграды на пути, и, следовательно, проявляется на меньшей наклонной дальности (располагается левее на изображении).

Ещё одна возможность хода сигнала при наличии моста и воды под ним — это отражение сначала от воды, затем от нижней, обращённой к воде, поверхности моста, после чего снова к воде и обратно к спутнику (*рис. 4*, см. с. 45).

Правая (и самая широкая) яркая полоса на изображении, отмеченная на *рис. 2* фиолетовым контуром, возникает именно таким образом. Следует учесть, что взволнованная поверхность воды может отражать не строго зеркально, в результате чего путь сигнала может удлиниться (см. светлые стрелки на *рис. 4*), поэтому изображение моста, полученное с помощью этого механизма, немного шире, чем основное.

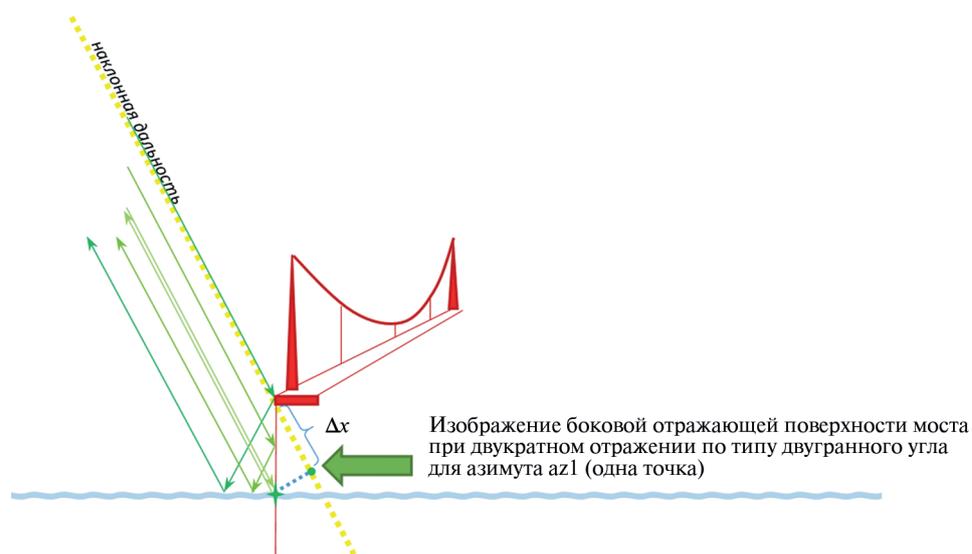


Рис. 3. Формирование изображения моста при отражении по типу двугранного угла от его боковой поверхности и воды (на *рис. 2* отмечено зелёным цветом)

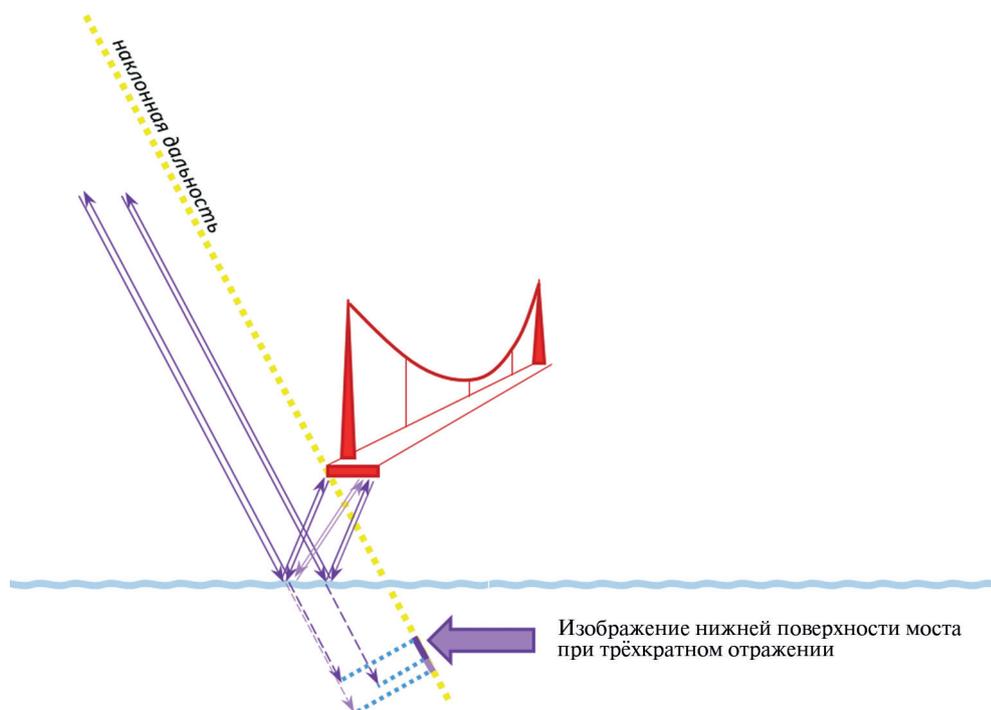


Рис. 4. Формирование изображения моста при трёхкратном отражении «вода – мост – вода» (на рис. 2 отмечено фиолетовым цветом)

Таким образом, на примере изображения моста «Золотые ворота» выявлено три основных механизма рассеяния: однократное обратное рассеяние, двукратное и трёхкратное. В формировании первого участвуют только элементы мостовой конструкции, находящиеся в прямой видимости спутника, во втором — водная поверхность и боковые поверхности вертикальных элементов моста и подвески, в третьем — вода и нижняя поверхность моста.

Мост Османа Гази в Турции

Действующий с 2016 г. мост Османа Гази через Измитский залив в Турции имеет схожие характеристики: это тоже висячий мост с двумя опорами высотой 252 м, длина моста составляет 2682 м, ширина 36 м, высота над водой 64 м.

На рис. 5 (см. с. 46) приведено изображение этого моста, полученное аппаратом Sentinel-1A 15 марта 2017 г., с нанесённой на него цветной разметкой. Отличия рис. 5 от рис. 1 и 2 следующие: полос наблюдается намного больше; удвоены не только зелёные полосы, но и другие (и это затрудняет оценку количества кратных отражений на глаз); имеются фрагменты изображений основных дугообразно висящих тросов подвески; башни-опоры видны не по всей своей высоте; рябь у берега в нижней части изображения делает некоторые из полос более яркими. Однако общие детали на рис. 5 и 2 тоже есть.

Перечислим рассмотренные выше механизмы рассеяния, присутствующие также и на рис. 5. Оранжевый цвет соответствует обратному рассеянию непосредственно от моста (точнее, от двух его параллельно идущих краёв; середина моста слишком гладкая, сигнал отражается от неё в сторону и не приходит назад к приёмной антенне), а также фрагментарно от опор (горизонтальные отрезки) и основных тросов подвески (штриховые дуги). Зелёным цветом показано отражение по типу двугранного угла, и снова это две прямых узких полосы, первая из которых сплошная, а вторая прерывается посередине моста. Фиолетовым отмечен механизм трёхкратного отражения «вода – мост – вода». Фиолетовая полоса состоит из двух параллельных узких полос с провалом посередине — так же, как и оранжевая, — однако здесь существенны детали не верхней части моста, а нижней.

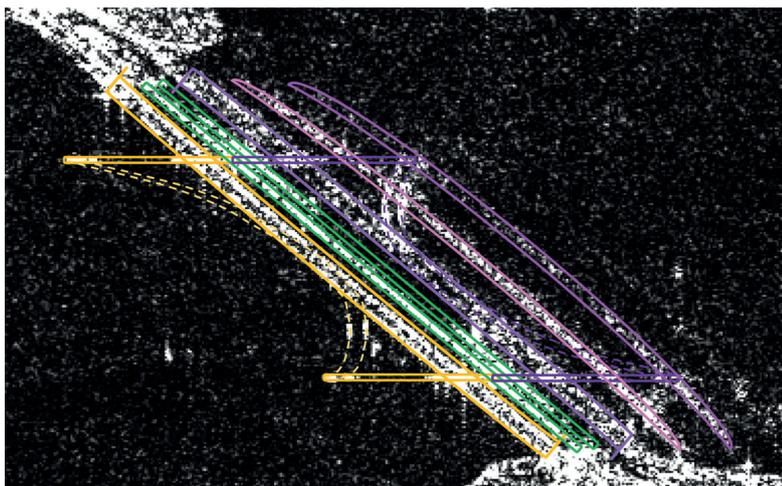


Рис. 5. Фрагмент изображения 3 марта 2017 г., включающий множественные кратные изображения моста Османа Гази

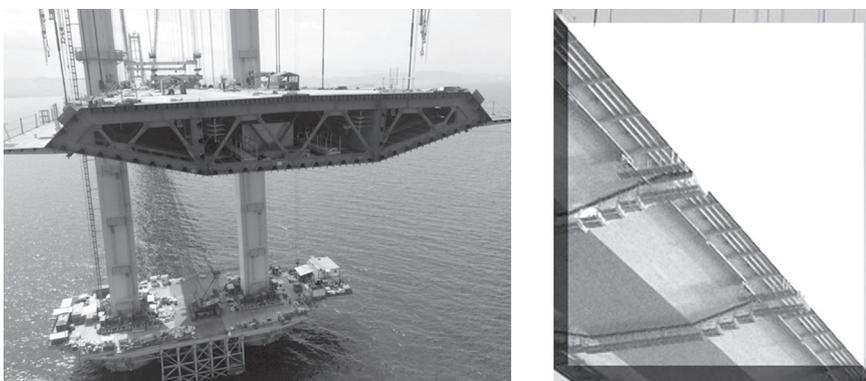


Рис. 6. Форма моста Османа Гази: а — в разрезе; б — дизайн нижней поверхности боковой горизонтальной панели

На рис. 6 мост Османа Гази показан детально. Слева, на рис. 6а, показан момент установки фрагмента моста и пролёт моста виден в разрезе. Нижняя поверхность моста состоит из пяти плоскостей: центральной горизонтальной, двух наклонных и двух узких горизонтальных «крыльев» по краям. Три основные панели плоские и гладкие, а боковые «крылья» имеют изломанный профиль, образованный параллельными выступающими рёбрами жёсткости, идущими вдоль всей панели (см. рис. 6б), и именно они обеспечивают сильное отражение с трансверсальных направлений.

На рис. 7 (см. с. 47) показан уточнённый механизм получения изображения моста Османа Гази при трёхкратном отражении: сигнал отражают неровности (рёбра) на нижних поверхностях «крыльев», при этом на изображении формируются две параллельные полосы, отстоящие друг от друга на величину, соответствующую ширине моста.

Помимо указанных механизмов, на рис. 5 реализуются ранее не рассмотренные, возникающие из-за особенностей формы моста. На рис. 8 (см. с. 47) фиолетовые стрелки отмечают путь прохождения сигнала, отразившегося сначала от воды, а затем от левой наклонной панели с нижней стороны моста. Этот путь по длине совпадает с показанным на рис. 7 и накладывается на правую полосу в широком фиолетовом контуре (на рис. 5 видно, что она несколько ярче левой). Это трёхкратное отражение «вода — мост — вода», поэтому цвет стрелок по-прежнему фиолетовый. Наличие ряби на водной поверхности залива размывает диаграмму рассеяния сигнала, поскольку на взволнованной поверхности воды имеются элементарные отражатели различного наклона, поэтому на рис. 8 не везде соблюдено равенство углов падения и отражения от условной горизонтальной поверхности. По этой же причине часть

сигнала после отражения от наклонной панели вниз отражается от воды не в сторону спутника, а зеркально, после чего снова попадает на нижнюю поверхность моста и возвращается к воде (первая пара розовых стрелок, ведущих к мосту и обратно, на *рис. 8* и светло-розовый контур на *рис. 5*). Количество отражений в этом случае возрастает до пяти. На *рис. 5* видны также семикратное отражение (ему соответствует вторая пара розовых стрелок на *рис. 8* и тёмно-розовый контур на *рис. 5*) и слабое девятикратное, лучше заметное в нижней части изображения (серые стрелки на *рис. 8*, цветной контур на *рис. 5* отсутствует). Лучшую видимость отражений в нижней части обеспечивают различия в характере ряби на воде вблизи берега и в центре залива. При каждом дополнительном отражении путь сигнала увеличивается приблизительно на удвоенную высоту моста. Аналогичные кратные отражения приведены в статье (Lee et al., 2006). Следует отметить, что схема отражений, предложенная в работе (Lee et al., 2006) и основанная на версии о дополнительном переотражении от деталей нижней стороны моста (как в случае моста Османа Гази на *рис. 7*), не вполне корректна, поскольку добавочное переотражение поменяло бы чётность кратных отражений, что сказалось бы на поляризационной картине, а этого нет. В действительности трапецевидный нижний профиль датского моста Большой Бельт из статьи (Lee et al., 2006) обеспечивает ту же схему переотражений, что и на *рис. 8*.

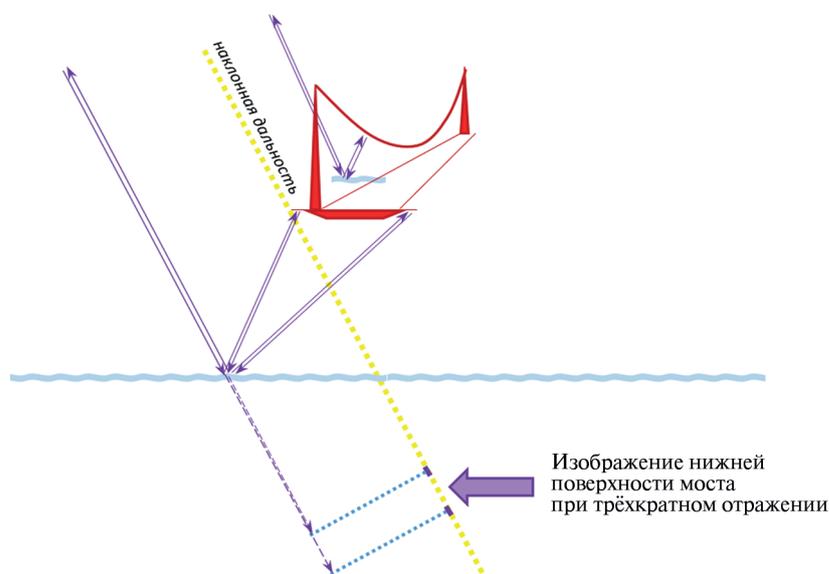


Рис. 7. Схема трёхкратного отражения от нижней части боковых панелей моста

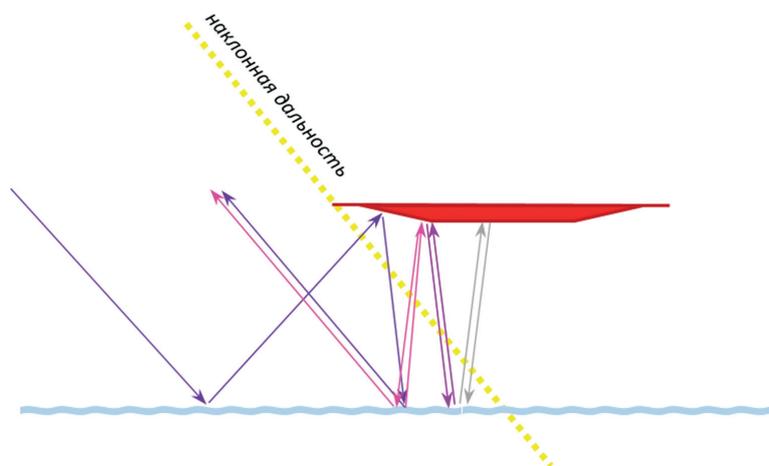


Рис. 8. Схема кратных отражений от воды и наклонных панелей на нижней стороне моста (на *рис. 5* отмечено фиолетовым, розовым и густо-розовым цветом)

Рассмотренные кратные отражения — это изображения только одной наклонной боковой панели, поэтому все они довольно узкие по сравнению с непосредственным изображением моста. Сигнал, зеркально отразившийся от двух остальных панелей, уходит в сторону и не даёт вклад в кратные изображения.

Подводя итог различным механизмам рассеяния, которые встретились на изображении моста Османа Гази, можно заметить, что главные три изображения с небольшими отличиями присутствуют и здесь. Дополнительные кратные изображения возникают из-за наклонного положения одной из нижних панелей моста, которая перенаправляет сигнал почти отвесно вниз.

Романовский железнодорожный мост через Волгу в Зеленодольске

Романовский железнодорожный мост в Зеленодольске является представителем другого типа мостов — он ферменный, состоит из невысоких бетонных опор, установленных в русле реки Волги, и уложенных на них металлических ферм. Мост состоит из двух независимых нитей, каждая содержит шесть основных пролётов длиной 158 м, у каждого берега имеется ещё по одному пролёту меньшей длины (рис. 9).

На рис. 10 представлены два радиолокационных изображения этого моста: слева — над открытой водой (сентябрь 2016 г.), справа — над льдом (февраль 2017 г.)



Рис. 9. Романовский мост в Зеленодольске



Рис. 10. Изображения Романовского моста, полученные аппаратом Sentinel-1А:
а — 11 сентября 2016 г.; б — 2 февраля 2017 г.

Интерпретация каждой из шести полос изображения в отдельности затруднена, поскольку мост состоит из двух ниток, расположенных параллельно в 20 м друг от друга и от воды (см. *рис. 9*). Высота фермы также составляет около 20 м. Совпадение этих размеров вкупе с близостью величины угла падения к 45° (около 40° в обоих сеансах) приводит к накладыванию изображений друг на друга.

Подробно механизмы рассеяния, приводящие к формированию каждой из шести полос на изображении, показаны на *рис. 11*. Фермы моста составлены из швеллеров (см. *рис. 9*), отражение от их углов даёт достаточно сильное обратное рассеяние. Отражения от «крыши» ферм показаны на *рис. 11* оранжевыми отрезками, отражения от настила моста — красными. Видно, что отражение от «крыши» правого моста примыкает к отражению от настила левого, давая вторую полосу на изображении, которая заметно ярче и несколько шире первой, являющейся изображением только «крыши» левой нити. Изображение поверхности правого моста (нижний красный отрезок) накладывается на результат рассеяния от воды и боковой вертикальной поверхности левого моста по типу двугранного угла (зелёная звезда на схеме *рис. 11*), и вместе они образуют третью полосу изображения. Четвёртая полоса образована аналогичным двугранным углом для второго моста (вторая зелёная звезда) и изображением левого моста снизу при тройном переотражении (фиолетовый цвет). Пятая полоса складывается из результатов тройного переотражения от настила правого моста и «крыши» левого. И, наконец, шестая полоса — результат тройного переотражения от воды и «крыши» правого моста.

Самая правая из шести полос (см. *рис. 10*) представляет особый интерес, поскольку здесь нет наложения сигнала других механизмов рассеяния конструкциями моста; по яркости этой полосы можно судить о влиянии ледового покрова реки на уровень зеркального отражения сигнала в схеме многократного переотражения. По нашим оценкам, удельная эффективная площадь рассеяния элементов изображения в пределах этой полосы снижается зимой на 16 дБ. Шероховатая ледовая поверхность на реке отражает сигнал заметно слабее, чем водная поверхность, что и приводит к ослаблению яркости шестой полосы на правом, зимнем снимке (см. *рис. 10*).

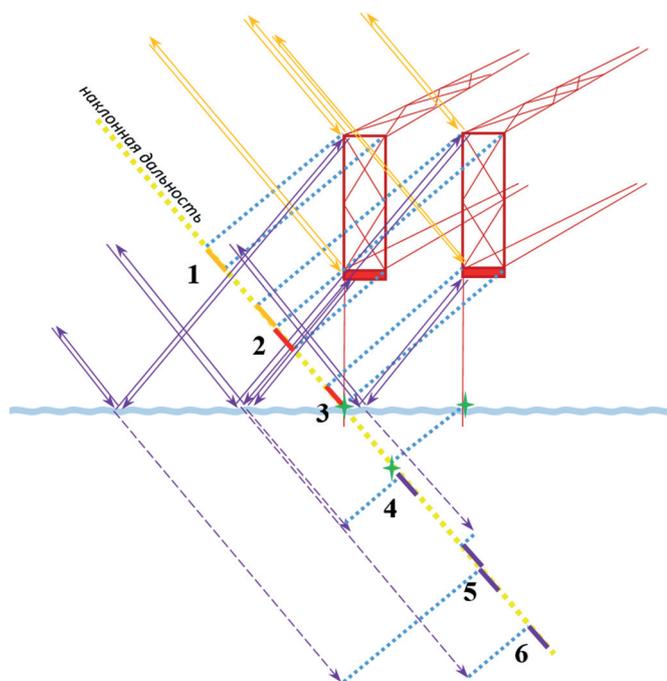


Рис. 11. Схема механизмов рассеяния от различных деталей Романовского моста. Оранжевые стрелки — однократное рассеяние от элементов моста; фиолетовые стрелки — ход сигнала при тройном переотражении; зелёным показано эффективное расположение места отражения сигнала при механизме «двугранный угол». Цифры 1–6 соответствуют шести полосам на *рис. 10*

Изображения кратности больше трёх в этом случае отсутствуют, поскольку нижняя поверхность моста не представляет собой гладкую плоскость, которая могла бы многократно перенаправлять сигнал к реке, как в предыдущем случае.

Заключение

Рассмотренные случаи позволяют заключить, что среди изображений мостов чаще всего встречаются три типа: однократное (отражение от верхней/боковой поверхности моста), двукратное (механизм двугранного угла с горизонтальной гранью, представленной водой или льдом) и трёхкратное (от воды, затем нижней поверхности моста и снова от воды).

В зависимости от наличия ряби на поверхности воды или неровностей на поверхности льда, кратные изображения могут быть сильнее или слабее выражены. При определённой геометрии съёмки и особенностях конструкции моста может происходить наложение изображений различной кратности друг на друга. В случае отражения сигнала от нижней поверхности моста вниз возможно появление дополнительных изображений моста нечётной кратности: пятой, седьмой и так далее.

Понимание механизмов рассеяния важно для правильной интерпретации данных интерферометрической съёмки мостов с целью наблюдения их потенциально опасной динамики, анализ которых предполагается в качестве продолжения данной работы.

Литература

1. *Cusson D., Ghuman P., Gara M., McCardle A.* Remote monitoring of bridges from Space. Anais do 54^o Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, Maceió-Alagoas. Brazil, 8–11 Oct. 2012.
2. *Lee J.-S., Pottier E.* Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. CRC Press, 2009. 438 p.
3. *Lee J.-S., Krogager E., Ainsworth T. L., Boerner W.-M.* Polarimetric analysis of radar signature of a man-made structure // IEEE Remote Sensing Letters. 2006. V. 3. Iss. 4. P. 555–559.
4. *Sousa J. J., Bastos L.* Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse // National Hazards Earth System Science. 2013. V. 13. P. 659–667.
5. *Sousa J. J., Hlaváčová I., Bakoň M., Lazický M., Patrício G., Guimarães P., Ruiz A. M., Bastos L., Sousa A., Bento R.* Potential of Multi-temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring // Procedia Technology. 2014. V. 16. P. 834–841.

Specificity of bridges appearance in radar images

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 mechanisms responsible for the formations of the bridges appearance in high resolution radar images are considered in the paper. Schemes of signal propagation and re-reflection within the framework of geometric optics are given; practical manifestation of the backscattering schemes mentioned is demonstrated on the Sentinel-1A spaceborne radar images. Three bridges under consideration have different constructions (two suspension bridges and a truss bridge) and functional assignment (automobile and railway ones); the bridges are located at different altitude above the water surface. It is important to mention also that the observation days were selected in different seasons of the year in order to have different state of the water surface below the bridges. Image layover effects are discussed in details with respect to observation geometry and bridge design. Three main scattering mechanisms are

delineated: single-bounce scattering from a bridge elements; double-bounce scattering including mirror-like reflection from water/ ice; triple-bounce with double participation of water/ice surface in scattering scheme. For the bridge located in a moderate climatic zone, a comparison of the signal backscatter in the case of clear water and ice covers beneath the bridge is made. The conditions ensuring appearance of higher order multi-bounce scattering are described.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), SAR image, bridges, multiple bounce, ray optics, scattering mechanisms.

Accepted: 31.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-42-51

References

1. Cusson D., Ghuman P., Gara M., McCardle A., Remote monitoring of bridges from Space, *Anais do 54^o Congresso Brasileiro do Concreto*, Maceió-Alagoas, Brazil, 8–11 October, 2012.
2. Lee J.-S., Pottier E., *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*, CRC Press, 2009, 438 p.
3. Lee J.-S., Krogager E., Ainsworth T. L., Boerner W.-M., Polarimetric analysis of radar signature of a man-made structure, *IEEE Remote Sensing Letters*, 2006, Vol. 3, Issue 4, pp. 555–559.
4. Sousa J. J., Bastos L., Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse, *National Hazards Earth System Science*, 2013, Vol. 13, pp. 659–667.
5. Sousa J. J., Hlaváčová I., Bakoň M., Lazecký M., Patrício G., Guimarães P., Ruiz A. M., Bastos L., Sousa A., Bento R., Potential of Multi-temporal InSAR Techniques for Bridges and Dams Monitoring, *Procedia Technology*, 2014, Vol. 16, pp. 834–841.