Использование поляриметрических радарных данных при космическом мониторинге паводков и наводнений

О.П. Архипкин, Г.Н. Сагатдинова

Национальный центр космических исследований и технологий, Алма-Ата, Казахстан E-mails: oarkhipkin@rambler.ru, mkmikikz@mail.ru

В статье дается описание новых направлений развития ГИС-технологии оперативного космического мониторинга схода снежного покрова и прохождения паводковых вод и наводнений, которая используется в практической деятельности органов ЧС Казахстана различного уровня уже 15 лет. В последние годы при оперативном мониторинге на регулярной основе используются оптические данные среднего разрешения Landsat-8 и Sentinel-2A, а также радарные данные Sentinel-1A. Новые правила оформления заказа позволяют также использовать при оперативном мониторинге данные высокого разрешения, в том числе радарные (например, TerraSar-X). Особую важность имеет применение радарных данных, так как очень часто в период активного паводка значительная часть оптических снимков не пригодна для анализа паводковой ситуации из-за высокой облачности. Использование при этом радарных данных с двумя поляризациями дает возможность получать дополнительную информацию о зонах затопления. Такую информацию можно получать за счет анализа самих данных, формирования различных комбинаций из разных поляризаций и при использовании методов радарной поляриметрии, включая фазовый анализ. В частности, с помощью текстурного анализа можно выделить затопленные объекты инфраструктуры (постройки, дороги, линии электропередач и др.) и растительность, а с помощью фазового анализа еще и влажные почвы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космический мониторинг, ГИС-технологии, паводки, зоны затопления, радарные данные, поляризация, поляриметрические методы

Одобрена к печати: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-175-184

Введение

Дистанционный контроль ситуации при прохождении паводковых вод и наводнений является одной из главных задач космического мониторинга ЧС, развиваемого в Казахстане с 2001 года. Это связано с тем, что практически ежегодно в каких-либо регионах на водных объектах возникают критические ситуации, представляющие потенциальную или реальную опасность. В последние два года, например, сильные для условий Казахстана паводки прошли в Акмолинской, Павлодарской и Карагандинской областях.

Для практического осуществления космического мониторинга паводков была разработана соответствующая система, состоящая из ряда ГИС-технологий (Arkhipkin, Spivak, Sagatdinova, 2010; Архипкин, Спивак, Сагатдинова, 2011). Космический мониторинг осуществляется в три уровня. Первый уровень базируется на данных низкого разрешения MODIS и позволяет ежедневно оперативно получать информацию о ситуации на всей исследуемой территории и отслеживать динамику её развития. На втором уровне периодически получаем с помощью данных среднего разрешения более детальную информацию о состоянии водных объектов на отдельных территориях. Третий уровень используется при необходимости получить особо точную и полную информацию о каких-либо водных объектах. Такую информацию получаем при использовании ДДЗ высокого и сверхвысокого разрешения.

Система космического мониторинга паводков представляет собой постоянно развивающуюся систему. Такое развитие осуществляется путем внедрения в систему новых задач, ДДЗ, методов, технологий и т.д. Так были введены в регулярное использование данные среднего разрешения: в 2015 году радарные со спутника Sentinel-1A, а в 2016 году – оптические Sentinel-2A. Введение в систему в 2017 году радарных данных со спутника Sentinel-1B значительно усилит информационность космического мониторинга паводков. Особо отметим важность использования радарных данных, так как очень часто в период активного прохождения паводковых вод из-за высокой облачности большая часть оптических снимков непригодна для анализа паводковой ситуации.

Радарные данные давно применяются при космическом мониторинге паводков. При этом преимущественно использовались радарные данные с одной поляризацией (VV или HH). Теперь все чаще используют для этих целей поляриметрические радарные данные с двойной или полной поляризацией. Дополнительную информацию по сравнению с однополяризационными данными можно получать и за счет анализа самих данных, и за счет формирования различных комбинаций из разных поляризаций, и при использовании методов радарной поляриметрии, включая фазовый анализ.

Использование радарных данных с двумя поляризациями для оперативного космического мониторинга паводков

Возможности использования двух поляризационных радарных данных были исследованы при проведении космического мониторинга паводков в Акмолинской, Павлодарской и Карагандинской областях Казахстана в 2015 году, в которых во второй половине апреля наблюдался сильный паводок. По ежедневным данным MODIS определялись районы с активной динамикой зон затопления, для которых скачивались с сайта Европейского Космического Агентства (ЕКА) радарные данные Sentinel-1А в режиме IWS (пространственное разрешение 25 м) с двойной поляризацией (VV/VH) в амплитудном формате GRD.

На основе анализа паводковой обстановки и потенциальной возможности оперативной радарной съемки в качестве базовых были выбраны 5 полигонов, расположенных в долинах рек Ишим, Нура и Иртыш, для которых во время периода активного прохождения паводковых вод в третьей декаде апреля 2015 года была проведена оперативная съемка радарных данных TerraSar-X в режиме StripMap (пространственное разрешение 3 м) с двойной поляризацией (HH/VV или HH/HV, или VV/VH) в комплексном формате обработки SLC. При этом в результате съемки был получен для дальнейших исследований полный набор всех четырех видов поляризации (VV, HH, HV, VH). Комплексный формат позволяет использовать при анализе космоснимков и амплитудную, и фазовую составляющие радарных данных.

Сама возможность оперативного заказа съемки радарных данных TerraSar-X возникла благодаря новым правилам, введенным компанией Airbus Defence and Space. Они допускают возможность заказа менее чем за сутки до съемки. Для этого надо предварительно согласовать число снимков и их стоимость, а время съемки определяется в дальнейшем исходя из текущей паводковой обстановки. Кроме возможности оперативной радарной съемки важнейшее значение имеет и время получения, обработки и выдачи выходных данных для органов ЧС после проведения съемки.

Время выставления после съемки данных TerraSar-X на FTP по заявлению Airbus Defence and Space составляет не более 1 часа. Скачивание с FTP при нормальной работе Интернета занимает также порядка часа. Время обработки данных TerraSar-X для получения растровой маски водной поверхности составляет порядка 4 часов. Таким образом, получить выходные формы для передачи заказчику можно за 6 часов, что является хорошим показателем для данных высокого разрешения.

Аналогичные временные интервалы по скачиванию, получению растровой и векторной масок водной поверхности характерны и для радарных данных среднего разрешения Sentinel-1A. Однако время выставления их в Интернет для скачивания после съемки составляет порядка 12 часов. Тем не менее выходные данные для представления органам ЧС можно получить на следующий день после съемки, что также можно считать неплохим результатом.

Отметим, что практически все полученные нами радарные данные пришлись как раз на период высокой облачности в пиковый период, что позволило контролировать процесс прохождения паводков и в эти дни. Получение радарных данных при наличии высокой облачности позволяет восполнить пробелы в информации о развитии паводковой ситуации и использовать их для совместного анализа с оптическими данными среднего или высокого разрешения.

Выделение водных объектов с использованием амплитудных характеристик поляриметрических радарных данных

Для предварительной и тематической обработки поляриметрических радарных данных использовался программный комплекс PCI Geomatica, а также программное обеспечение Sentinel-1 Toolbox (S1TBX), которое входит в программный комплекс SNAP, разработанный ЕКА прежде всего для обработки данных со спутников Sentinel.

Спекл-шум уменьшает качество изображения и делает его визуальное и цифровое распознавание достаточно сложной задачей. Для удаления спекл-шума используются различные фильтры: усредняющие, медианные, сглаживающие, Гамма-Гауссовы, Ли, Фроста и ряд других. Однако такое снижение спекл-шума сопровождается ухудшением разрешения, которое может привести к потере при дальнейшем дешифрировании мелких одиночных объектов. В связи с этим фильтрация на предварительном этапе применялась только в тех случаях, при которых она необходима, например, при текстурном анализе. В других случаях фильтрация используется уже в качестве постклассификационной процедуры для укрупнения классов, например, с помощью процедуры Majority/Minority Analysis, а также удаления пикселей определенного размера.

Водная поверхность обладает малой отражательной способностью в направлении луча радара, что делает ее темной на космическом радарном изображении, но в силу различных факторов существует много параметров, влияющих на характер отображения водной поверхности на радиолокационном снимке, что приводит к ее неоднородности и неоднозначности. При этом в различных поляризациях получается разное изображение водной поверхности, что само по себе позволяет выбирать в каждом конкретном случае наилучшую поляризацию для ее отображения. Обычно считается, что в большинстве случаев наилучшее отображение получается в поляризации HH, достаточно хорошее – в VV, в перекрестных поляризациях – похуже, но тоже пригодное для выделения водных объектов (Manjusree et al., 2012). Но бывает и иначе. Так, для снимка TerraSAR-X за 27 апреля 2015 года канал с HH поляризацией хуже дешифрируется на предмет выделения водной поверхности, чем канал с HV поляризацией (*puc. 1*).



Рис. 1. Радарный космоснимок TerraSar-X с двойной поляризацией (НН/НV) за 27 апреля 2015 г.

Определенные возможности предоставляет и составление различных RGB-композитов на основе разных поляризаций (*puc. 1*). При этом в каналах можно использовать и отдельные поляризации, и различные их комбинации. Так, радарные снимки TerraSAR-X давались с RGB-комбинациями вида (HH, VV, HH-VV). В нашем случае хорошие результаты получались при RGB-комбинациях (HH, VV, HH*VV), (VV, VH, VV*VH) и (HH, HV, HH*HV). Получающийся RGB-композит нередко позволяет проводить более качественную классификацию объектов и усилить дешифрируемость интересующих нас объектов. При обработке данных в интересах органов ЧС большое значение имеет время получения выходных данных. При оперативном мониторинге паводков и наводнений часто используется достаточно быстрый и простой метод классификации – пороговая классификация (Manjusree et al., 2012). Этот метод не требует больших вычислительных ресурсов, его результаты обладают большой степенью надежности и позволяют оперативно идентифицировать значительную часть площадей затоплений.

Прямое пороговое дешифрирование проводит классификацию подстилающей поверхности на основе попиксельного анализа величины обратного рассеяния. Водные поверхности имеют низкое значение обратного рассеяния, тогда как окружающая территория имеет обычно более высокие значения обратного рассеяния, обусловленные усиленной шероховатостью поверхности. Значение порога, при котором вода выделяется в качестве отдельного класса, часто является постоянным для каждого спутника и зависит от угла съемки и типа поляризации. Для определения таких значений были проанализированы статистические распределения значений пикселей, выделенных на радарных снимках ТеггаSar-X и Sentinel-1A водных поверхностей. В результате чего были получены пороговые значения для каждого вида поляризации этих спутников, с помощью которых проводилось выделение водных поверхностей.

Совместное использование двух поляризаций для выделения с помощью метода пороговой классификации водных объектов позволяет без применения фильтров значительно снизить зернистость по сравнению с каждой из поляризаций. Так, на *рис. 2* приведены маски водной поверхности для фрагмента космоснимка TerraSAR-X за 22 апреля 2015 года, полученные для каждой поляризации отдельно и при совместном их использовании. Здесь четко фиксируется значительное уменьшение зернистости по результатам совместной классификации, что упрощает дальнейший анализ.



Рис. 2. Маски водной поверхности для фрагмента космоснимка TerraSAR-X за 22 апреля 2015 г.

Использование текстурного анализа для классификации водных поверхностей по поляриметрическим радарным данным

Хорошей информативностью при идентификации различных объектов по радарным снимкам обладает текстурный анализ изображений (Haralick, 1979; Popescu, Dobrescu, 2008; Poдионова, 2012). Вычисляются текстурные характеристики на основании сопряженности уровней яркости изображения в локальном прямоугольном окне. Текстурная информация получается по результатам расчета статистических характеристик текстуры на основе матрицы смежности уровней яркости, то есть на основе многопиксельного анализа (Haralick, 1979). При этом можно использовать более 20 статистических признаков. Анализ различных текстур показал, что в нашем случае наиболее информативными для решения задачи выделения водных объектов оказались контраст, энтропия и второй угловой момент. Контраст определяется как $\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} (i-j)^2 P_{ij}$, энтропия $= -\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \ln(P_{ij})P_{ij}$, второй угловой момент $= \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} P(i,j)^2$. Здесь N – число уровней яркости, P_{ij} – нормализованная симметричная матрица смежности уровней яркости (GLCM) размерностью N×N.

Энтропия выражает неравномерность распределения яркостных свойств элементов изображения. Контраст определяется величиной локальных вариаций яркости изображения. С увеличением числа локальных вариаций контраст возрастает. Второй угловой момент характеризует степень однородности. С помощью текстурного анализа можно выделить механизмы рассеяния, а по ним классифицировать подстилающую поверхность, так как разные типы поверхностей имеют характерные механизмы рассеяния радиоволн. Выделяют три основных механизма отражения радиоволн: одиночное отражение (single bounce scattering), двойное отражение (double bounce scattering), объемное отражение (volume scattering). Первый характерен для водных поверхностей, второй — для хозяйственных и жилых построек, третий – для растительности.

Вычисления текстур «контраст», «энтропия» и «второй угловой момент» осуществлялись в программном комплексе SNAP (Sentinel Application Platform), находящемся в открытом доступе. В результате анализа по текстурам «энтропия», «контраст» и «второй угловой момент» различных поляризаций для радарных космоснимков TerraSar-X и Sentinel-1A были получены классификационные признаки для выделения различных типов подстилающей поверхности. Для каждой поляризации хорошая визуализация результатов получается при использовании RGB-комбинации (энтропия, контраст, второй угловой момент). На *рис. 3* представлены результаты текстурного анализа в виде RGB-композита для поляриметрических радарных данных Sentinel-1A за 26 апреля 2015 года в районе поселка Талапкер Акмолинской области.

Из сравнения результатов текстурного анализа в поляризациях VH и VV (*puc. 3*) видим, что различные текстурные объекты по-разному выделяются в них. Так, линейные объекты лучше выделяются в VH поляризации, а площадные (поля) – в VV поляризации. Помимо водной поверхности были также выделены объекты инфраструктуры, такие как постройки, дороги и линии электропередач. Итоговый слой в ГИС был создан на основе совместного текстурного анализа двух каналов с VH и VV поляризациями. Особо отметим, что затопленные линии электропередач (точечная линия над водной поверхностью) четко выделяются в обеих поляризациях.



VH полризация

VV поляризация

Рис. 3. Результат текстурной классификации поляриметрического радарного космоснимка Sentinel-1A за 26 апреля 2015 г. района поселка Талапкер

На *рис.* 4 приведен пример текстурной классификации различных водных объектов для фрагмента долины реки Иртыш в Павлодарской области по радарным данным TerraSAR-X за 29 апреля 2015 года. Здесь водные объекты делим на три класса: зоны затопления (на *рис.* 4 «вода»), зоны затопления с растительностью (затопленная растительность) и постоянные водные объекты, определяемые как водные поверхности, существую-



Рис. 4. Классификация водных объектов по результатам текстурного анализа по радарным данным TerraSAR-X за 29 апреля 2015 г.

щие в течение всего сезона отсутствия льда. Маску постоянных водных объектов формируем по осенним данным Landsat, когда водная поверхность минимальная. Таким образом, зоны затопления на какой-либо территории определяем как разницу текущей водной поверхности и поверхности постоянных водных объектов, тем самым конкретизируем само понятие «зона затопления».

Выделение водных объектов на поляриметрических радарных данных с использованием фазовой информации

Использование фазовой информации поляриметрических радарных данных с несколькими поляризациями позволяет с помощью процедуры поляриметрической декомпозиции определить механизм рассеяния радиоволн (Lee, Pottier, 2009). При использовании 4-х и 2-х поляризационных радарных данных генерируется матрица рассеяния для каждого пикселя радарного изображения, в которой содержится информация о поляриметрических свойствах рассеяния исследуемой области. Из матрицы рассеяния методом декомпозиции или путем вычисления матрицы когерентности могут быть получены следующие параметры поляризации: энтропия (H), анизотропия (A) и средний угол поворота плоскости поляризации (α).

Энтропия представляет собой степень хаотичности рассеяния, ее значения лежат в пределах от 0 до 1. Значению H = 0 соответствует механизм однократного идеального рассеяния, а значению H = 1 – полное диффузное рассеяние. То есть нарастание энтропии соответствует увеличению шероховатости поверхности и/или усложнению ее структуры, формирующей объёмную составляющую рассеяния. Анизотропия – это параметр, дополнительно характеризующий энтропию. Она может быть полезной для обнаружения отличий при значениях энтропии H > 0,7. Угол поворота плоскости поляризации характеризует доминирующий механизм рассеяния. Значение $\alpha = 0$ соответствует рассеянию на поверхности, значение $\alpha = 45$ – объёмному рассеянию, а значение $\alpha = 90$ – двойному отражению или многократным переотражениям. С использованием матрицы рассеяния проводится необучаемая классификация H alpha wishart classification радарных данных.

Для данных ТеггаSAR-Х при анализе фазовой составляющей была рассчитана когерентность для различных вариантов пар поляризаций, в результате которой выяснилось, что наилучшей парой, при которой вода выделяется наилучшим способом, является кополяризационая пара HH/VV. Когерентность используется при совместном фазово-амплитудном анализе радарных данных, пример которого дан на *рис. 5*, где представлены RGB композиты по результатам такого анализа данных TerraSAR-X за 22 апреля 2015 года. В качестве красного канала идет рассчитанная когерентность, зеленого – среднее значение амплитуды обоих каналов, синего канала – разница амплитуд. Полученный композит использовался для разделения затопленных и влажных участков с выделением затопленных объектов (растительность, хозяйственные постройки).



Рис. 5. Разделение водных объектов и влажных почв, рассчитанное по когерентности и амплитудам для радарных данных TerraSAR-X за 22 апреля 2015 г.

Здесь отметим, что в процессе разработки алгоритмов и выставления порогов принималось во внимание существование класса увлажненных почв, который старались по возможности учитывать. К этому классу также относятся такие мелкие водные объекты, как лужи, так как обычно пространственное разрешение используемых для мониторинга радиолокационных данных не позволяет эти объекты идентифицировать.

Итоги и перспективы

Космический мониторинг схода снежного покрова и прохождения паводковых вод уже 15 лет используется органами ЧС Казахстана различного уровня для оценки текущей ситуации. В последние годы его развитие осуществляется как за счет внедрения новых методов и технологий, в том числе связанных с радарной поляриметрией и использованием на регулярной основе радарных данных среднего разрешения, так и за счет разработки алгоритмов моделирования и прогноза развития чрезвычайных ситуаций в регионах и создании надежных механизмов доведения результатов до соответствующих органов управления. Это позволит повысить информативность результатов космического мониторинга и более полно отразить текущую и потенциальную ситуацию с прохождением паводковых вод и наводнений.

Работа выполнена в рамках Целевой научно-технической программы «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» Республики Казахстан по теме «Разработать технологии и методы космического мониторинга предупреждения и контроля паводков, наводнений и нефтяных разливов на основе методов радарной поляриметрии».

Литература

- 1. Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н. Некоторые новые направления космического мониторинга водных объектов в Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоca. 2011. T. 8. № 1. C. 101-111.
- 2. Родионова Н.В. Текстурная сегментация одноканальных изображений: примеры применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 65–69.
- Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N. Development of Flood Space Monitoring in Kazakhstan // Geoscience and Remote Sensing New Achievements. Vukovar, Croatia: In Teach. 2010. P. 419–436. Haralick R.M. Statistical and structural approaches to texture // Proc. IEEE. 1979.Vol. 67. No. 5. P. 786–804. 3.
- Δ
- 5.
- Lee J.-S., Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications. CRS Press, 2009. 440 p. Manjusree P., Prasanna Kumar L., Bhatt C.M., Srinivasa Rao G., Bhanumurthy V. Optimization of Threshold Ranges for Rapid Flood Inundation Mapping by Evaluating Backscatter Profiles of High Incidence Angle SAR Images // Int. J. Disaster Risk Sci. 2012. No. 3 (2). P. 113–122. 6
- Popescu D., Dobrescu R. Carriage Road Pursuit Based On Statistical And Fractal Analysis Of The Texture // 7. NÁUN International Journal of Education and Information Technologies. 2008. Vol. 2. No. 1. P. 62-70.

The use of polarimetric radar data for space monitoring of high waters and floods

O.P. Arkhipkin, G.N. Sagatdinova

National Center of Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan *E-mails:* oarkhipkin@rambler.ru, mkmikikz@mail.ru

In the article, new developments in GIS-technology of operational space monitoring of snow cover destruction and passage of high waters and floods are described. This technology has been used for already 15 years by emergency agencies of Kazakhstan. In recent years, medium resolution optical data of Landsat-8 and Sentinel-2A and radar data of Sentinel-1A are used on a regular basis for operational monitoring. Recently, an access to high resolution data including radar (for example, TerraSar-X) has been gained. The possibility to use radar data during active flood is important because optical images are not suitable for the analysis of flood situation due to extensive cloud cover. Radar data at two polarizations provide additional information on flooding zones. Such information can be obtained by analyzing the data itself or combining different polarizations and using radar polarimetry methods, including phase analysis. In particular, texture analysis enables recognition of flooded vegetation and infrastructure (buildings, roads, power lines, etc.) and phase analysis also includes moist soils.

Keywords: remote sensing, space monitoring, GIS-technology, high waters, zones of flooding, radar data, polarization, polarimetric methods

> Accepted: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-175-184

References

- Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N., Nekotorye novye napravleniya kosmicheskogo monitoringa 1. vodnykh ob"ektov v Kazakhstane (Some new directions of space monitoring of water objects in Kazakhstan), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 101–111.
- 2. Rodionova N.V., Teksturnaya segmentatsiya odnokanal'nykh izobrazhenii: primery primeneniya (One channel texture based segmentation: application examples), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli
- *iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 65–69. Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N., Development of Flood Space Monitoring in Kazakhstan, *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*, Vukovar, Croatia: In Teach, 2010, pp. 419–436. Haralick R.M., Statistical and structural approaches to texture, *Proc. IEEE*, 1979, Vol. 67, No. 5, pp. 786–804. 3.
- 4.
- Lee J.-S., Pottier E., *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*, CRS Press, 2009, 440 p. Manjusree P., Prasanna Kumar L., Bhatt C.M., Srinivasa Rao G., Bhanumurthy V., Optimization of Threshold Ranges for Rapid Flood Inundation Mapping by Evaluating Backscatter Profiles of High Incidence Angle SAR Images, *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 2012, No. 3 (2), pp. 113–122. 6
- 7. Popescu D., Dobrescu R., Carriage Road Pursuit Based On Statistical And Fractal Analysis Of The Texture, NÂUN International Journal of Education and Information Technologies, 2008, Vol. 2, No. 1, pp. 62–70.