

Совместный анализ оптических и радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли в задачах анализа и мониторинга территории

В.Н. Копенков¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В настоящее время активно применяется комплексный подход к обработке данных дистанционного зондирования, при котором предполагается совместное использование результатов измерений, полученных при помощи различных инструментов и технологий, среди которых важную роль играют сенсоры, производящие съемку как в оптическом, так и радиолокационном диапазонах. Подобное объединение данных позволяет достичь выигрыша по сравнению с отдельной обработкой за счет расширения объема получаемой информации и возможностей получения данных (метеоусловия, различные спектральные диапазоны и т.д.). Однако, на сегодняшний день, практически не существует качественных и апробированных методов и алгоритмов совместного использования оптических и радиолокационных космических снимков, позволяющих выполнять обработку данных в автоматическом режиме. Поэтому, разработка методов совместного анализа оптических и радиолокационных данных являются безусловно актуальными. В работе представлена информационная технология совместной обработки оптических и радиолокационных космических снимков, основанная на обучении процедуры обработки на основе эталонных значений – данных с датчиков одного типа (в базовом приближении оптических), с последующим применением на данных как того же типа (оптических), так и данных другого типа (радарных).

1. Введение

В настоящее время многие проблемы фундаментальных наук, технические и прикладные задачи могут быть решены только с применением космических средств, т. к. их использование существенно сокращает материальные, финансовые и временные затраты по сравнению с традиционными методами. На сегодняшний день возможно регулярное получение многозональной аэрокосмической информации в оптическом и радиодиапазонах. В последнее время все большую актуальность приобретают задачи определения различных характеристик земной поверхности, мониторинга и анализа чрезвычайных ситуаций, классификации и анализа территорий в целом. Особое место занимают задачи классификации подстилающей поверхности и видового состава. Традиционно, для решения данной задачи в качестве исходных данных активно используются снимки, полученные в оптическом диапазоне электромагнитного спектра. Классические методы, успешно используемые для дешифрирования оптических изображений, не дают положительные результаты при работе с данными, полученными радарными с синтезированной апертурой. Распознавание типов

растительности, границ территорий, выделение и классификация объектов по радиолокационным изображениям практически не производится, т.к. методы цифровой обработки и тематической интерпретации радиолокационных данных не достаточно хорошо разработаны и исследованы. Например, все известные алгоритмы автоматической классификации, адаптированы к Гауссовской модели распределения аддитивного шума, возникающего на оптических изображениях. Радиолокационные изображения высокого разрешения, сформированные радаром с синтезированной апертурой в результате облучения поверхности Земли когерентными волнами, обычно разрушены мультипликативным шумом, известного как спекл-шум. Спекл-шум представляет серьезную проблему при классификации радиолокационных изображений стандартными методами. Поэтому необходимы методы обработки и анализа изображений, адаптированные к физическим и техническим особенностям формирования радарных изображений.

2. Схема совмещения радиолокационных и оптических данных

Традиционно, технология совмещения и обработки разнородных данных ДЗЗ состоит из 3-х основных подзадач: предварительной независимой обработки, согласования и совмещения космических снимков, полученных различными сенсорами в оптическом и микроволновом диапазонах, детектирования различий и дальнейшей обработки данных ДЗЗ.

В рамках первой задачи известные решения объединяют в себе методы интерполяции данных на неравномерной сетке, частотные методы восстановления изображений, адаптивную фильтрацию [1], радиометрическая, геометрическая и поляриметрическая калибровка (для поляриметрических радиолокационных данных)[2], операции улучшения качества изображений [1], подавление неизбежных спекл-шумов на радиолокационном изображении, орторектификации, с учетом цифровой модели рельефа и т.д. Существующие подходы обычно решают задачу, используя предположения об одинаковых характеристиках съемочных систем, которые схожее разрешение в пространстве и одни и те же спектральные диапазоны регистрации сигнала.

Задача согласования разнородных изображений необходима для реализации дальнейшей цели – совместного анализа радиолокационных и оптических космических снимков, и относится к области обработки и анализа данных [3-5]. При этом следует уделить особое внимание выбору метода слияния. От него зависит тип и объем предварительной подготовки данных. Например, в случае точечных методов необходимо высокоточное геокодирование и дальнейшее совмещение всех изображений. В случае объектной обработки – предварительное обнаружение, выделение и, возможно, распознавание объектов на изображениях, так как наблюдаемые на радиолокационных изображениях объекты часто выглядят совершенно иначе, чем на оптических, поскольку рассеяние радиосигнала и солнечного света объектами может существенно отличаться. Радиолокационные и оптические наблюдения являются взаимодополняющими, причем эта дополняемость может иметь разный характер в зависимости от решаемой задачи. Их совместная обработка улучшает возможности обнаружения тех или иных объектов и измерения параметров подстилающих покровов. Общая классическая схема совмещения радиолокационных и оптических данных приведена на рисунке 1.

При этом для решения практических задач, в большинстве случаев, комбинирование оптических и радиолокационных данных реализуется двумя способами.

В ситуации, когда оптических данных нет в наличии, радиолокационные данные могут служить хорошей альтернативой. При совместной обработке, в данном случае, выполняется ортотрансформирование данных, и приведение к сравнимому разрешению (либо оптический снимок может иметь более низкое разрешение, так как изобразительные способности таких изображений выше). После чего анализируются точки, либо объекты на обоих изображениях для решения задачи выявления различий и неизменных областей, а так же для дальнейшего анализа данных ДЗЗ.

Второй вариант совмещения данных основан на преобразовании $RGB \leftrightarrow HIS$, которое позволяет совместить на одном выходном изображении информацию о местности, полученную в двух разных диапазонах. Сначала выполняется преобразование трех наиболее

информативных спектральных каналов RGB \rightarrow HIS (яркость-насыщенность-отенок цвета), затем в полученном изображении яркость заменяется на радиолокационный снимок и проводится обратное преобразование, при проведении которого необходимо сбалансированное растяжение каналов для повышения качества конечного представления в RGB. По таким изображениям можно определить шероховатость (низкая/высокая растительность, затопленный/незатопленный район), и структурность территории, что необходимо для геологических задач.

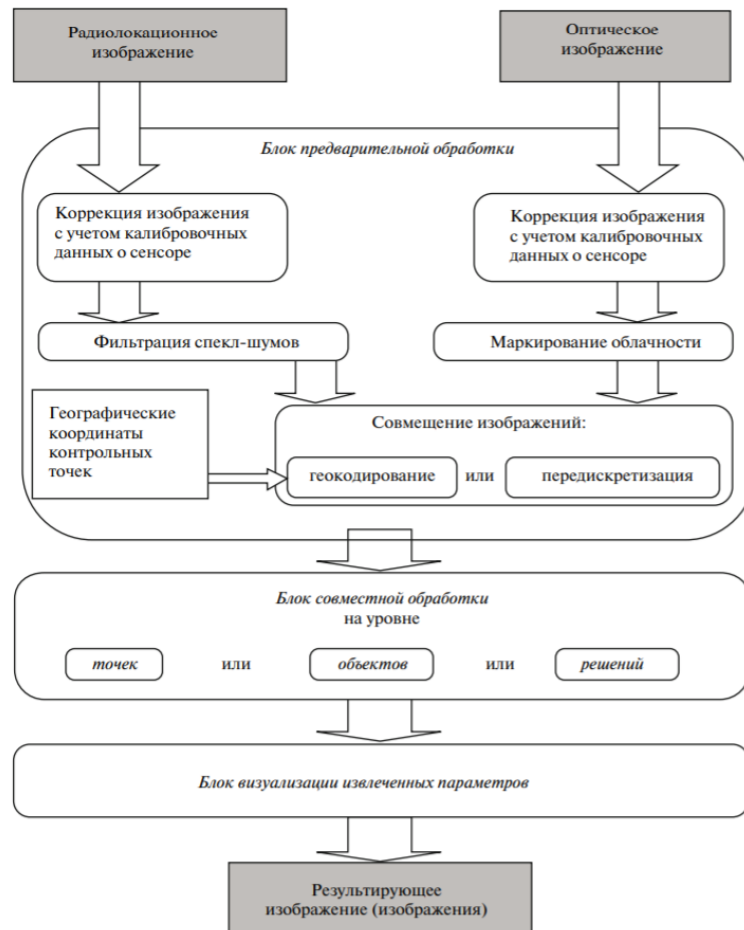


Рисунок 1. Классическая схема совмещения радиолокационных и оптических данных.

Однако и первый и второй вариант совмещения данных не подходят для качественного решения задач классификации подстилающей поверхности и анализа.

3. Технология совместной обработки оптических и радарных данных на основе обучающей выборки

Анализ и обработка изображений, полученных разнородными сенсорами ДЗЗ, с повышением пространственного и спектрального разрешения обычно предполагает формирования частных моделей наблюдения для каждого из сенсоров, что не всегда возможно и требует наличия большого количества дополнительной априорной информации о модели наблюдения. Кроме того, на основе множества частных моделей наблюдения крайне сложно разработать автоматическую адаптивную технологию обработки разнородных данных ДЗЗ.

Поэтому, наибольший интерес для проработки представляют методы нелинейного анализа и интерпретации данных (например в виде нейросетей или иерархических структур) и Approximate Local Correlation Integral (aLOCI). Эти методы могут быть использованы без определённых предположений по поводу исходных данных, кроме того aLOCI использует квадродеревья для повышения эффективности вычислений в многомерном случае. Среди

данных методов в нашей задаче предполагается использовать многомерную классификацию на основе оптических данных, поскольку решение задачи анализа микроволнового сигнала в общем случае может быть произведена в виде классификации с обучением, на основе признаков в виде оптических данных, результатов наблюдений, априорной информации о подстилающей поверхности [6-7].

При этом, поскольку интерес представляет оценка повышения качества тематической классификации, целесообразно использовать стандартные для многомерных данных способы извлечения признаков и алгоритмы классификации. К ним чаще всего относят: признаки, полученные в результате метода главных компонент PCA и непараметрического взвешенного метода извлечения признаков Nonparametric Weighted Feature Extraction – NWFЕ), и такие классификаторы как метод опорных векторов (SVM) и Random Forest (RF) [5-6]. Разработанный алгоритм локальной обработки космических снимков на основе иерархической регрессии [6] позволяет ускорить обработку данных за счёт использования иерархических структур данных и получить в многомерном случае производительность сравнимую, либо превосходящую другие методы классификации, в частности нейронные сети. И наконец оценка качества результатов классификации и обнаружения изменений на территории по получаемым разнородным космическим снимкам, относятся к области анализа изображений на основе значений одного сенсора ДЗЗ по значениям другого сенсора (например, расчёт функции регрессии) [7,10-11].

Таким образом, построение технологии предполагается производить в три этапа: подготовка данных, совмещение и анализ последовательности изображений. На первом этапе предполагается использование сенсорозависимых методов обработки и совмещения (пространственного) данных, т.е. учитываются особенности источника космических снимков (оптика или радар), но предполагается, что наблюдаемая территория одна и та же. После чего, радарные изображения "приводятся к виду" оптических (либо оптические изображения "приводятся к виду" радарных, в зависимости от задачи) на основе признаков и регрессионных нелинейных моделей. И наконец, формируется последовательность изображений с подобными спектральными характеристиками, позволяющая реализовать решение задач тематической обработки – классификации, выделение изменений и пр.

В настоящей работе для формирования совокупного множества космических снимков, подходящих в качестве исходных данных для решения задач классификации и анализа изменений, предлагается технология преобразования (поточечной обработки на основе эталонных значений) данных одного типа (предположительно радарных) на основе обучающей выборки, состоящей из набора данных другого типа (оптических изображений). Предполагается использование регрессионных моделей обработки на основе дерева решений для слияния извлеченных радиолокационных SAR (Synthetic-aperture radar) и оптических значений датчиков. Иерархические структуры в виде дерева решений не являются параметрическими и поэтому не требуют однозначного описания желаемых классов. И хоть отсутствие данных о всестороннем обучении препятствует оценке точных функций плотности вероятности, однако итоговая процедура обработки состоит из набора явных иерархических условий (правил, порогов функций), применяемых к интервалам входных данных, в нашем случае SAR и оптических функций, в качестве эталонных значений. Что позволяет проклассифицировать отсчеты (области отсчетов) радиолокационного изображения как функцию от оптических данных. Классификаторы дерева решений были успешно применены для классификации подстилающей поверхности. Общая схема преобразования данных (в процессе применения процедуры обработки), ориентированная на априорную информацию о желаемом результате обработки, (представлена в статьях [6,10]), проиллюстрирована схемами представленными на рисунке 2.

Рассматривая большое количество согласованных пар отсчетов изображений (z_i, x_i) как обучающую выборку, строим процедуру обработки сигнала Φ , ставящего в соответствие вектору признаков $\{y_k(n, [\mathbf{p}])\}_{k=0}^{K-1}$, вычисляемых по дискретным отсчетам входного сигнала X , выходное значение сигнала Z . Наборы признаков, параметры построения процедуры обработки,

а так же вид функций элементарной регрессии в терминальных узлах могут корректироваться по результатам оценки качества обработки.

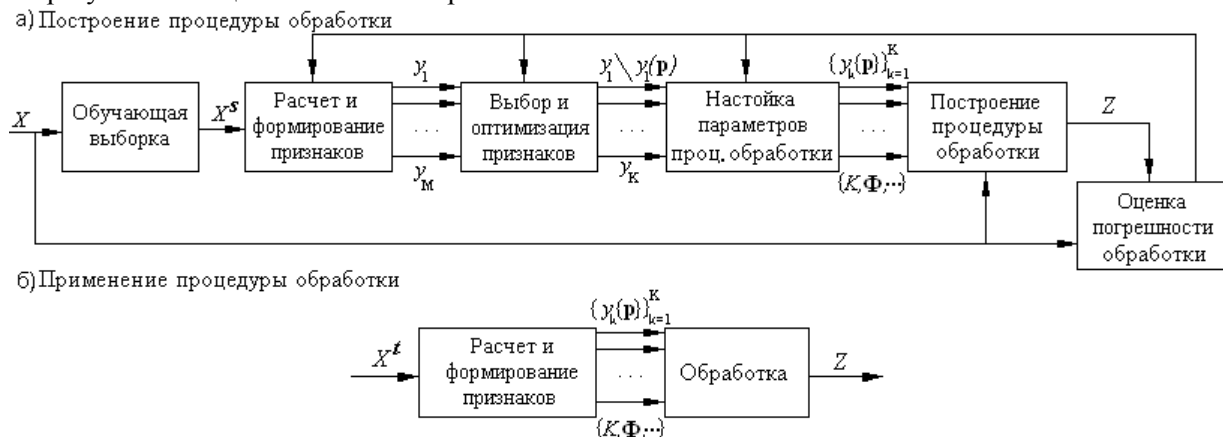


Рисунок 2. Схема использования процедур обработки, на основе обучающей выборки.

Для оценки обобщающей способности построенной процедуры используется функционал полного скользящего контроля:

$$Q^{st}(\mu(\Omega), \Omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v(\mu(\Omega_n^s), \Omega_n^t),$$

где Ω – конечный набор объектов для обучения (прецедентов), $\mu(\Omega)$ – алгоритм (метод) обучения на наборе для обучения Ω , (Ω_n^s, Ω_n^t) , $n = 1, 2, \dots, N$ – варианты разбиения выборки Ω на обучающую и контрольную выборки. $v(\mu(\Omega_n^s), \Omega_n^t)$ – частота ошибок алгоритма $\mu(\Omega_n^s)$, построенного на основе выборки Ω_n^s , проверяемого по выборке Ω_n^t .

Поскольку съёмка различными системами приводит к смещению положения ячеек датчиков относительно объектов как из-за различий в параметрах орбит спутников, так и из-за различия физических законов формирования пикселей на изображении (разрешение – разнородно для оптических и радарных данных), то очевидно, что ячейки отдельных датчиков покрывают наблюдаемую область сетками с различными параметрами, что может быть описано как относительное движение в рамках системы координат наблюдаемой сцены. В качестве системы координат наблюдаемой сцены можно использовать некоторую проекционную систему координат, в которой каждый пиксель представляется в виде в виде площадки конечного размера, полагая, что координаты отсчёта изображения являются координатами центра пикселя. Данное представление не противоречит технологии обработки на основе деревьев решений, так как последние могут использовать интегральные значения в спектральных каналах по локальному окну, в качестве признаков для входных и выходных пикселей.

Таким образом, технология формирования последовательности согласованных и совмещенных разнородных изображений ДЗЗ используется для получения признаков для задачах тематической классификации подстилающей поверхности по данным ДЗЗ, а так же для задач анализа изменений на последовательности снимков.

4. Оценка объема обучающей выборки и экспериментальные исследования

Решение задачи построения процедуры обработки, основанной на прецедентах с учетом всех сочетаний обучающей и контрольной выборок на практике нереализуемо вследствие возникающего гигантского перебора по различным сочетаниям выборок. Поэтому необходимо использовать решающую процедуру, позволяющую оценить необходимость завершения или продолжения формирования обучающих и тестовых выборок по некоторому конечному их числу. Очевидно что, для всякой задачи существует оптимальная сложность модели, при которой достигается наилучшее качество обобщения.

В работе [10] предложена технология принятия решения об остановке процесса перебора различных сочетаний обучающей и контрольной выборок, согласно которой, для принятия решения об остановке процесса генерации необходимо построить доверительные интервалы для математического ожидания распределения Пуассона с параметром λ : $Bin(n, \lambda/n) \approx P(\lambda)$.

для функционала полного скользящего контроля по выборкам N_1 и N_2 в виде:

$$\left[\lambda_1 - \frac{\tau_{1-\alpha/2} \sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{N_1}}, \lambda_1 + \frac{\tau_{1-\alpha/2} \sqrt{\lambda_1}}{\sqrt{N_1}} \right] \left[\lambda_2 - \frac{\tau_{1-\alpha/2} \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{N_2}}, \lambda_2 + \frac{\tau_{1-\alpha/2} \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{N_2}} \right],$$

где $\tau_{1-\alpha/2}$ – квантиль распределения $N_{0,1}$ уровня $1-\alpha/2$ ($\alpha = 1-\gamma$).

Решение о прекращении генерации различных сочетаний обучающей и контрольной выборок принимается в тот момент, когда достигается непересечение указанных доверительных интервалов на соседних шагах.

Представленная технология принятия решения об остановке процесса перебора позволяет оценить объем и возможные сочетания обучающего и контрольного наборов данных, которые используются в экспериментальных исследованиях.

В качестве данных, использующихся в качестве обучающей и контрольной выборок, планируется использовать наборы снимков (свободно-распространяемых данных) со спутников Landsat-7 и Sentinel 1-2 за разные временные периоды, а так же данные спутника Radarsat-2, имеющиеся в распоряжении центра приема данных ДЗЗ Самарского Университета. В качестве опорных данных в оптическом диапазоне будут использованы наборы данных со спутников Landsat-7, Spot 6/7, Аист, Ресурс-П, Pleiades и покрытие территории данными Google и Яндекс. Экспериментальные исследования применимости разработанной технологии к разнородным наборам данных (оптические и радарные данные) находятся в стадии реализации, поэтому конечные результаты не приведены в рамках данной статьи. Экспериментальные исследования реализуемости отдельных этапов обработки, классификации и анализа данных ДЗЗ на основе иерархических структур, построенным в соответствии с принципами обучения "по прецеденту" представлены в работах автора [6, 10, 11].

5. Заключение

В данной статье представлена новая информационная технология совместной обработки оптических и радиолокационных космических снимков, основанная на обучении процедуры на основе эталонных значений – данных с датчиков одного типа (в базовом приближении оптических), с последующим применением на данных как того же типа (оптических), так и прочих разнородных данных (радарных данных). Планируется проведение экспериментальной апробации разработанных регрессионных моделей обработки на основе дерева решений для слияния данных полученных в оптическом и SAR диапазонах. Что, в итоге, позволит проклассифицировать отсчеты (области отсчетов) радиолокационного изображения как функцию от оптических данных. Проведенные ранее эксперименты [6,10,11] по оценке эффективности использования деревьев решений в качестве классификаторов подстилающей поверхности продемонстрировали высокое качество классификации, что позволяет предположить возможность применения данного подхода к задаче совместного анализа оптических и радиолокационных данных.

6. Литература

- [1] Wan, X. Super-resolution image reconstruction / X. Wan, Y. Yang // Computer Application and System Modeling (ICCSAM). – 2010. – Vol. 8. – P. 351- 355.
- [2] Никольский, Д.Б. Методы обработки радиолокационных данных. Геоматика. – 2016. – №2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geomatika.ru/clauses/48/> (01.10.2018).
- [3] Копенков, В.Н. Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы / В.Н. Копенков, В.В. Сергеев, В.А. Соيفер, А.В. Чернов // Вестник РФФИ. – 2017. – Т. 3, № 95. – С. 78-96. DOI: 10.22204/2410-4639-2017-095-03-78-96.

- [4] Захарова, Л.Н. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения, перспективы / Л.Н. Захарова, А.И. Захаров, М.В. Сорочинский, Г.П. Рябоконь, В.М. Леонов // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 1. – С. 5-19.
- [5] Schmitt, M. Fusion of SAR and optical remote sensing data – Challenges and recent trends / M. Schmitt, F. Tupin, X.X. Zhu // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128239.
- [6] Копенков, В.Н. Конструирование процедуры локальной обработки изображений, основанной на иерархической регрессии, предназначенной для решения задач обработки космических снимков // Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2013. – Т. 10, №2. – С. 284-295.
- [7] Hughes, L.H. Investigation of joint visibility between SAR and optical images of urban environments. / L. H. Hughes, S. Auer, M. Schmitt // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2018. – Vol. IV-2.
- [8] Mandanici, E. Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use / E. Mandanici, G. Bitelli // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8(12). – P. 1014.
- [9] Копенков, В.Н. Метод остановки процесса построения иерархической регрессии при реализации вычислительных процедур локальной обработки изображений // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 351-355.
- [10] Багаутдинов, Р.С. Исследование возможности использования космических снимков для выявления археологических объектов / Р.С. Багаутдинов, В.Н. Копенков, В.Н. Мышкин, В.В. Сергеев, С.А. Трибунский // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 439-444. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-439-444.
- [11] Копенков, В.Н. Алгоритм автоматического построения процедуры локальной нелинейной обработки изображений на основе иерархической регрессии / В.Н. Копенков, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 257-266.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов: № 16-29-09494 офи_м, № 17-29-03190 офи, № 18-07-00748, а так же при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/Ч3363/26).

Combined usage of the optical and radar remote sensing data in territory monitoring tasks

V.N. Kopenkov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. At the present time a lots of problems in a sphere of fundamental sciences as well as technical and applied tasks can be solved only with the use of satellite images, since their usage reduces material, financial and time costs significantly in comparison with traditional methods. One of the modern integrated approach remote sensing processing is to join the measurements obtained from the various sources, such as optical and radar sensors, allowing to achieve a gain in comparison with independent processing due to the extension of the information volume and the opportunities of data acquisition (weather conditions, spectral ranges, etc.). However, methods of digital processing and interpretation of radar data as well as qualitative and proven methods and algorithms for joint processing of optical and radar satellite images has not sufficiently been well developed yet. Therefore, the development of new methods and information technology of joint analysis and interpretation of optical and radar data which are a major issue of current paper, are certainly relevant. The paper present an information technology for joint processing of optical and radar satellite imagery, based on training the processing procedure based on the reference values of data from sensors of the one type (optical data), followed by applying to the both data types: optical and SAR data.