

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

В. А. Кузнецов*, В. С. Марюхненко**, Б. М. Миронов**, А. Н. Потоцкий*

*ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

**Иркутский государственный университет путей сообщения

Поступила в редакцию 12.05.2017 г.

Аннотация. В статье рассматривается методика проведения системного анализа, в результате которого обоснованы направления реализации алгоритмов автоматического обнаружения и распознавания наземных объектов на радиолокационных изображениях. Приведены математическая модель радиолокационного изображения с учетом спекл-шума, сравнительные результаты оценки эффективности дешифрирования и результаты оценки времени обработки с помощью многопроцессорных вычислительных систем.

Ключевые слова: системный анализ, радиолокационное изображение, обнаружение, распознавание.

Annotation. In this article the system analysis procedure is considered, which result directions for realization of ground targets automatic detection and recognition on radar images algorithms. The mathematical model of radar image into account speckle-noise, estimate of interpretation efficiency comparative results and estimate of processing time with multiple-CPU systems results are demonstrated.

Keywords: system analysis, radar image, detection, recognition.

ВВЕДЕНИЕ

Обладание информацией является основой развития современного общества. Оперативная и достоверная информация становится решающим фактором успеха при организации промышленного производства, в бизнесе, при подготовке и ведении вооруженной борьбы и в иных сферах человеческой деятельности. Один из путей сбора информации – удаленный мониторинг стратегических объектов, территории и акватории государства. Среди способов мониторинга в силу целого ряда объективных преимуществ следует выделить радиолокационное дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Радиолокацион-

ное ДЗЗ позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) земной поверхности днем и ночью, на больших дальностях и при различных погодных условиях.

Основу современных радиолокационных средств ДЗЗ составляют радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА), размещаемые на борту авиационных и космических носителей. РЛИ, полученные с помощью РСА, отличаются потенциально высокой разрешающей способностью, поэтому являются ключевым элементом современных и перспективных информационных систем. РСА широко применяются для оперативного мониторинга состояния объектов промышленной и транспортной инфраструктуры, управления устранением последствий чрезвычайных ситуаций, контроля важных подвижных транспортных объектов

© Кузнецов В. А., Марюхненко В. С., Миронов Б. М., Потоцкий А. Н., 2017

и наблюдения за опасными быстропротекающими природными явлениями: ледовой обстановкой, появлением и развитием цунами, атмосферными вихрями. В подобных задачах основным фактором является получение достоверной информации в реальном или псевдореальном масштабе времени. Однако особенности РЛИ, а именно высокая зашумленность, геометрические искажения, нестационарность объекта наблюдения и сильная зависимость от стабильности траектории движения носителя требуют их предварительной обработки и дешифрирования, что связано с большими временными затратами. Кроме того, обработка таких РЛИ, полученных одновременно на разных длинах волн, влечет за собой еще большие вычислительные затраты и еще больший объем данных.

Разрешение противоречия между необходимостью предоставления результатов дешифрирования РЛИ в реальном масштабе времени и большим объемом получаемых данных РСА, возможно путем автоматизации процесса дешифрирования: предварительной обработки, обнаружения наземных объектов на РЛИ и их распознавания. Задача автоматизации дешифрирования РЛИ является многогранной. Её решение предполагает синтез сложных, многоуровневых, часто вероятностных, с обратной связью алгоритмов. При этом необходимо обеспечить оптимальные характеристики обнаружения и распознавания объектов. Подобные задачи возможно решить методами системного анализа. Ценность системного подхода в решении вышеуказанных задач состоит в том, что он создает основу для логического и последовательного подхода к проблеме автоматического дешифрирования РЛИ [1]. Процедуры и методы системного анализа направлены на выдвижение альтернативных вариантов решения задачи и их сопоставление по тем или иным критериям эффективности. Именно поэтому адекватным инструментом исследований систем обработки данных является системный анализ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дешифрирование РЛИ подразумевает его предварительную обработку, обнаружение объектов и их распознавание. Одним из самых затратных этапов (как в вычислительном и временном, так и в финансовом смысле) является распознавание РЛИ наземных объектов. При этом этап обнаружения объектов можно рассматривать как частный случай их распознавания.

В общем случае, распознавание изображений Ω при множестве возможных решений системы распознавания $L = \{l_1, \dots, l_k\}$ сводится к определению оптимального алфавита классов $A^0 = \{A^1, \dots, A_\alpha, \dots, A_r\}$ и оптимального рабочего словаря признаков $x^0 = \{x_1, \dots, x_N\}$, которые при наилучшем решающем правиле обеспечивают максимальную эффективность R :

$$R = R(A^0, x^0) = \max_{A_\alpha} \max_x R =$$

$$= \max_{A_\alpha} \max_x \sum_{i=1}^{m_\alpha} P_{i\delta}(\Omega_i^{A_\alpha} | x) G(\Omega_i^{A_\alpha}), \quad (1)$$

где $P_{np}(\Omega_i^{A_\alpha} | x)$ – оценка апостериорной вероятности правильного решения задачи распознавания, $G(\Omega_i^{A_\alpha})$ – значения эффективности, получаемые системой распознавания от конкретных решений из множества возможных решений L [2]. Другими словами, необходимо определить $A_\alpha = A^0$ из множества $A = \{A^1, \dots, A_\alpha, \dots, A_r\}$ и вектор $x = x^0$, которые при наилучшем решающем правиле доставляют экстремальное (максимальное) значение величины R (1) при соблюдении ограничений $C = \sum_{j=1}^N x_j C_j \leq C_0$ на затраты по созданию комплекса технических средств системы, обеспечивающих измерение признаков рабочего словаря. В качестве основных показателей эффективности используются быстродействие и вероятность правильного распознавания P_{np} .

Общая постановка проблемы распознавания объектов может быть сформулирована следующим образом: в условиях первоначального (априорного) описания исходного множества объектов на языке априорного словаря признаков необходимо в пределах вы-

деленных ресурсов на построение измерительной аппаратуры определить оптимальный алфавит классов и оптимальный рабочий словарь признаков, которые при наилучшем решающем правиле обеспечивают наиболее эффективное использование решений, принимаемых по результатам распознавания неизвестных объектов системой распознавания.

ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Геометрия проведения радиолокационной съемки с авиационного носителя в режиме полосового обзора представлена на рис. 1, где обозначены основные условия наблюдения, используемые в данной статье. Основными требованиями при этом являются постоянство скорости и линейность траектории полета носителя РСА.

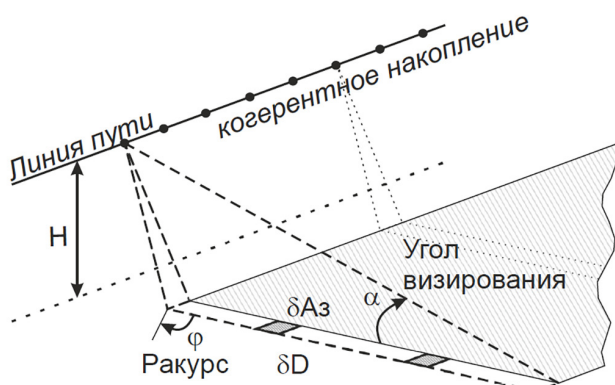


Рис. 1. Упрощенная схема проведения авиационной радиолокационной съемки

Особенности дифракции электромагнитных волн радиодиапазона на поверхности искусственных объектов сложной формы определяют принципиальные отличия РЛИ от изображений, получаемых системами видимого диапазона. Обычно полагают, что поле отраженной волны является результатом суммирования элементарных полей в точке расположения РСА, создаваемых отраженными сигналами от элементов dS выпуклой поверхности S [3]:

$$E_{omp} = \frac{1}{\lambda} \int_S \frac{E_n}{D} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} D \right) \right\} \cos \Theta dS, \quad (2)$$

где λ – длина волны РСА; E_n – напряжен-

ность поля падающей волны; D – дальность до элемента dS поверхности S ; Θ – угол между направлением «РСА- dS » и нормалью к элементу dS . При обеспечении постоянства разрешения РСА по азимуту δl_{az} путем увеличения числа когерентно накапливаемых импульсов $N_{кн}$ максимальная дальность обнаружения примет вид [3]:

$$D_{max} = \sqrt[3]{\frac{P_{cp} G^2 \lambda^2 \sigma}{2(4\pi)^3 Q_{CA} \kappa T k_{ш} \alpha_n V_c \sin \Theta \delta l_{az}}}, \quad (3)$$

где P_{cp} – средняя мощность передатчика, G – коэффициент усиления антенны, σ – эффективная поверхность рассеяния (ЭПР):

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i, \quad (4)$$

где σ_i – ЭПР i -го отражателя, N – количество элементарных отражателей, Q_{CA} – отношение сигнал/шум в элементе разрешения, $\kappa T = 4 \times 10^{-21}$ Вт/Гц, $k_{ш}$ – интегральный коэффициент шума входного устройства приемника; α_n – потери в высокочастотном тракте и среде распространения, V_c – скорость носителя РСА, δl_{az} – разрешающая способность РСА по азимуту:

$$\delta l_{az} = \frac{\lambda D}{2V_c t_{кнРСА} \sin \Theta}, \quad (5)$$

где $t_{кнРСА}$ – время когерентного накопления (синтезирования).

К основным особенностям РЛИ следует отнести «дробление» изображения ввиду зеркального отражения падающих под малыми углами радиоволн в сторону от РСА и затенения части поверхности объектов, блики из-за очень сильных отражений от плоских поверхностей, спекл-структура РЛИ, обусловленная интерференцией сигналов, рассеянных элементарными отражателями поверхности в каждом элементе разрешения РСА, ложные отметки из-за ошибок дискретизации сигналов, эффект плановости РЛИ, геометрические искажения, наличие радиолокационной тени, влияние поляризации на контраст объектов на РЛИ, значительная зависимость РЛИ объектов от длины волны (рис. 2, а-г), углов визирования α и ракурсов φ (рис. 2, д-з). Поэтому при различных условиях одни и те же объекты на РЛИ могут быть классифициро-

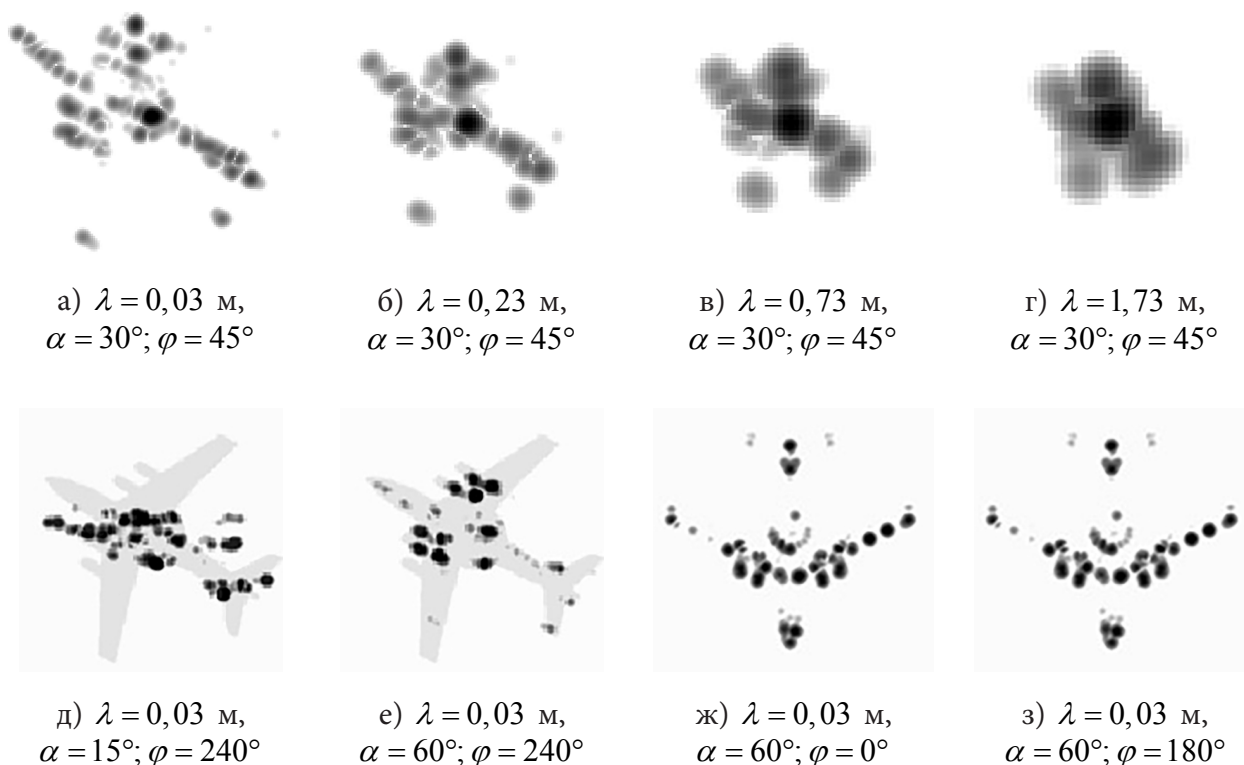


Рис. 2. Зависимость радиолокационных портретов наземного объекта типа «самолет А-50» от условий наблюдения

ваны как простые или сложные, точечные или распределенные (РО).

Как видно на радиолокационных портретах (РЛП), полученных моделированием [4, 5], преобладающая доля отраженной от объекта энергии (до 90 %) сосредоточена в нескольких «блестящих точках» или доминантных центрах отражения (ДЦО), причем для разных условий эти центры соответствуют различным элементам конструкции и могут быть использованы в качестве характерного признака объекта.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Системный анализ проблемы автоматического дешифрирования РЛИ в реальном масштабе времени проводится в три этапа. На первом этапе (рис. 3) выполняется декомпозиция по трем направлениям (факторам): объекты мониторинга, способы получения изображения и ограничения при дистанционном зондировании Земли.

В результате их анализа были сделаны выводы:

- предъявленным ограничениям удовлетворяет лишь радиолокационный способ получения изображения;
- ряд особенностей и недостатков РЛИ требует последующей его обработки;
- в результате анализа различных способов получения изображения установлено, что для обработки изображений широко применяются методы теории распознавания образов.

Таким образом, на этапе синтеза принято решение использовать элементы теории распознавания образов при создании алгоритмов автоматизированной обработки РЛИ.

На втором этапе (рис. 4) системного анализа из возможных способов получения РЛИ принято решение использовать когерентный радиолокатор с синтезированной антенной, преимущество которого в более высокой разрешающей способности.

На третьем этапе (рис. 5) на основе анализа особенностей РЛИ объектов, условий наблюдения, требований к качеству изобра-

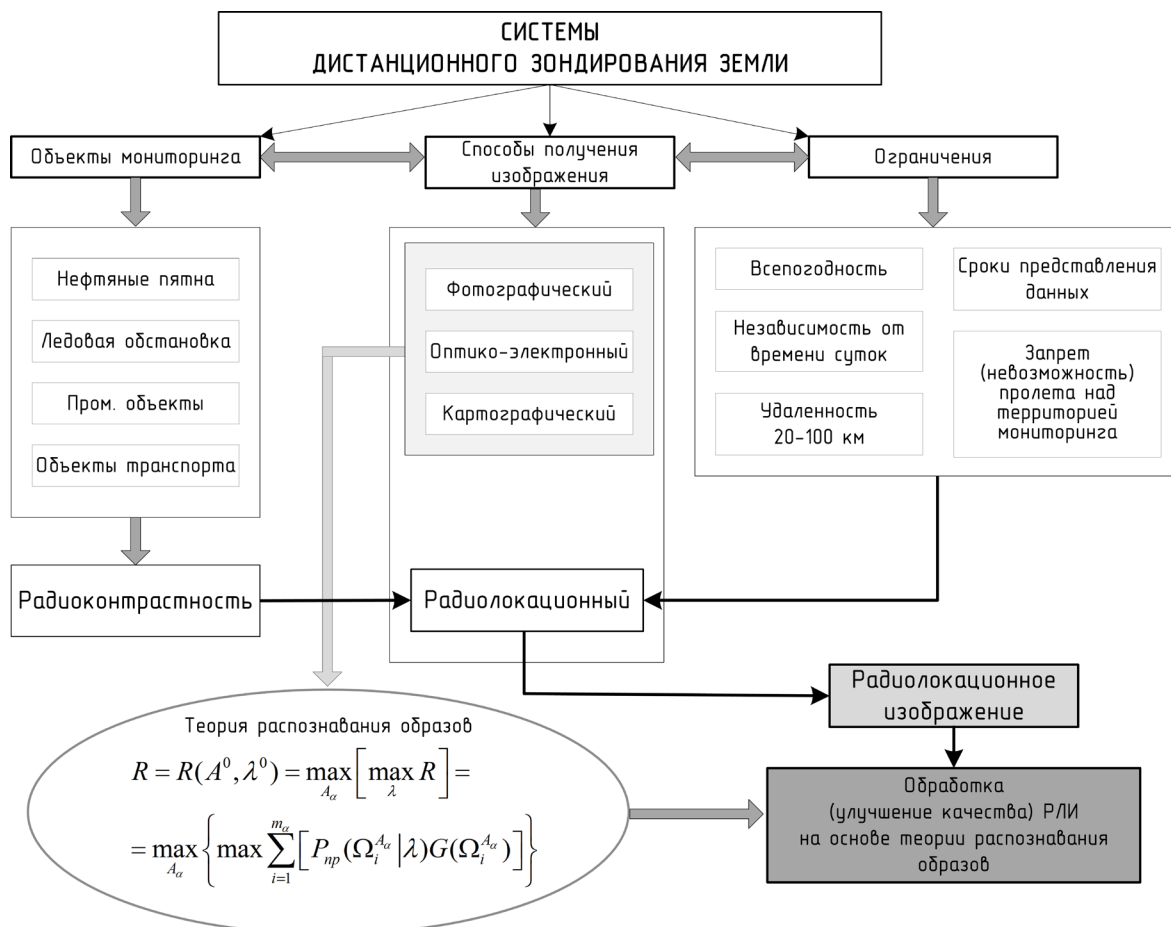


Рис. 3. Промежуточные результаты проведения системного анализа

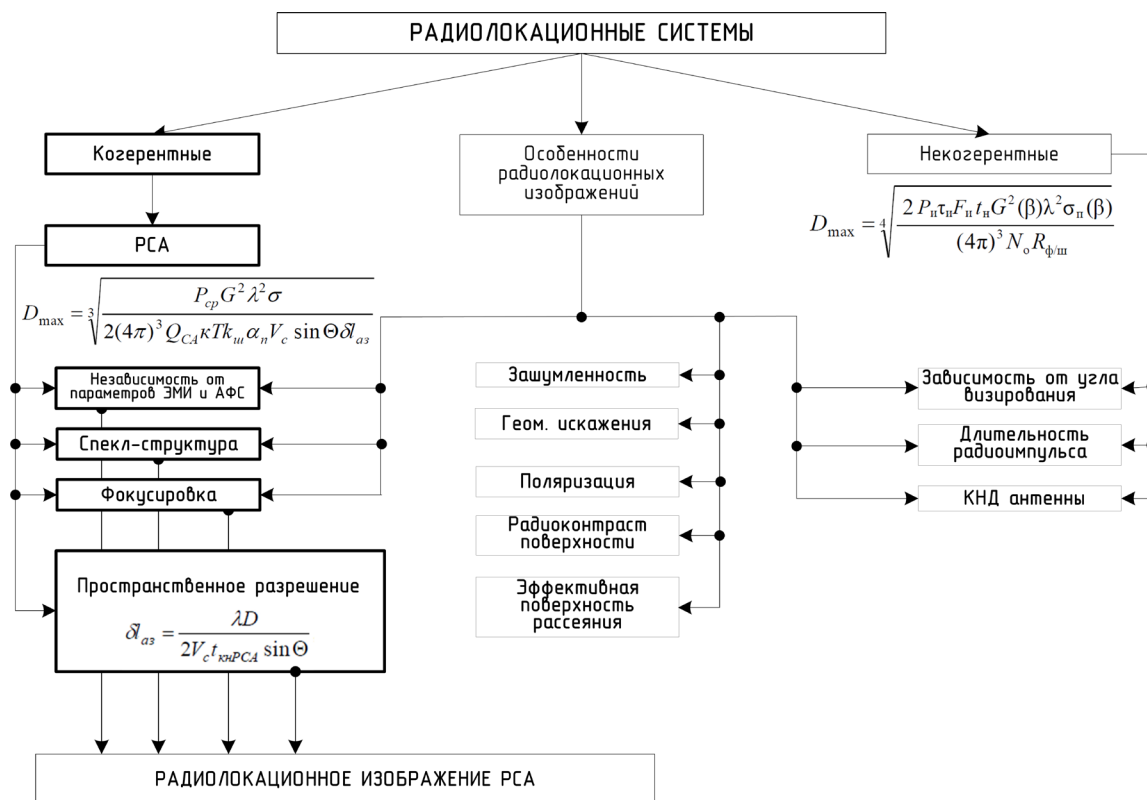


Рис. 4. Промежуточные результаты проведения системного анализа

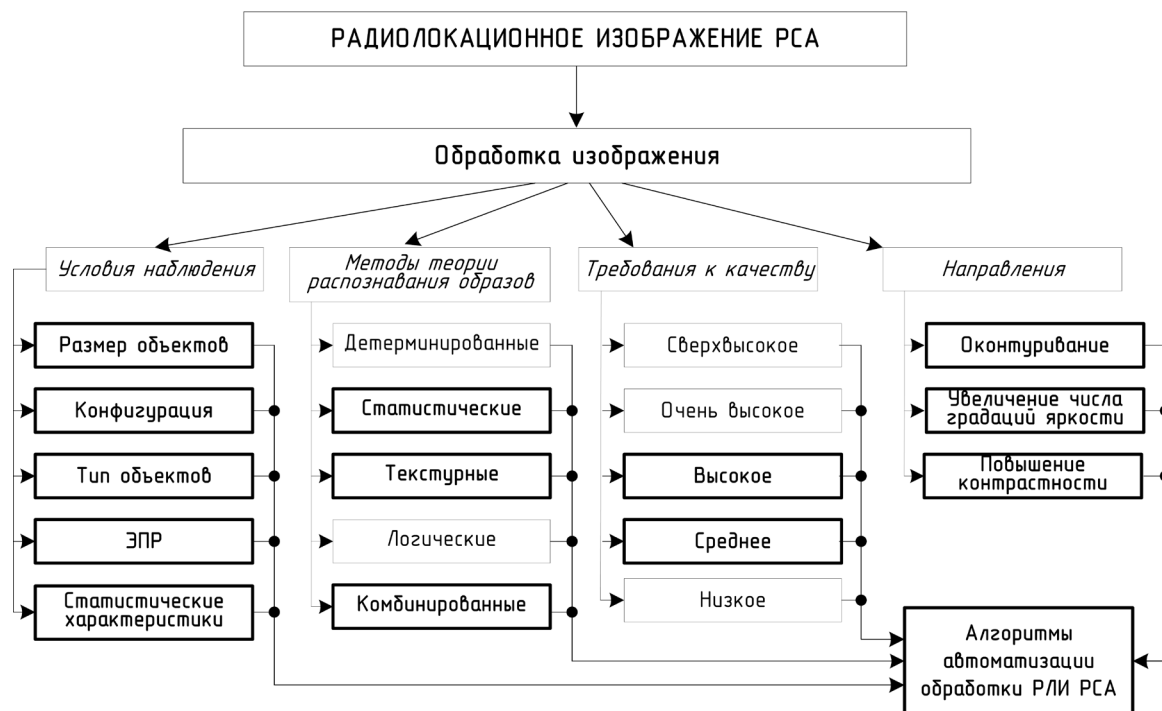


Рис. 5. Промежуточные результаты проведения системного анализа

жений, известных способов обработки РЛИ, с учетом методов теории распознавания образов ставится задача синтеза таких алгоритмов обнаружения и распознавания объектов, которые позволили бы решить задачу автоматизации дешифрирования РЛИ РСА и получать информацию в реальном масштабе времени.

В том случае, если используется многодиапазонная РСА, поставленная задача значительно усложняется при явном преимуществе – одновременная радиолокационная съемка одного и того же участка местности на разных длинах волн позволяет существенно повысить достоверность информации и получить качественно новые характеристики объектов и подстилающей поверхности. Вместе с тем, требуется параллельная обработка многочастотных РЛИ, что существенно ужесточает требования к производительности вычислительной системы. В итоге возникает принципиально новая задача принятия решений на уровне слияния многочастотных РЛИ или результатов дешифрирования, обуславливающая перспективность проведения дальнейших исследований в данном направлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

В качестве возможного результата системного анализа могут быть представлены математическая модель РЛИ и алгоритмы автоматического обнаружения и распознавания распределенных объектов.

РЛИ, полученное на одной рабочей частоте РСА, можно представить в виде совокупности однородных (по значениям яркости) участков (ОУ). Яркости ОУ искусственных объектов с достаточной точностью могут быть описаны распределением Рэлея, а ОУ естественных объектов (поверхностей) – гамма-распределением. Корреляционные функции исследуемых ОУ имеют экспоненциальный вид с узким пиком в пределах 1–3 элементов изображения (ЭИ), что обусловлено наличием спекл-шума на РЛИ и говорит о слабых корреляционных связях между соседними ЭИ [5]. Для сглаживания спекл-шума целесообразно использовать фильтр Ли [6], поскольку он обеспечивает высокое качество подавления спекл-шума, не требует больших затрат на обработку, не разрушает структуру РЛП, при малых размерах окон не искажает форму и размеры ОУ. Тогда сглаженные ОУ с достаточной точно-

стью могут быть аппроксимированы гауссовским законом распределения яркостей. В этом случае РСА, в качестве формирователя изображения, представляет собой систему со случайной сменой структуры [7], которая описывается уравнением со скачкообразным изменением:

$$\lambda_{k+1} = \rho^{(i)} \lambda_k + m^{(i)} (1 - \rho^{(i)}) + \xi_k^{(i)}, \quad (6)$$

$$(i = \overline{1, M}, k = 0, 1, \dots),$$

где λ_k – значение яркости k -го ЭИ, $\rho^{(i)} = \exp(-\alpha^{(i)} \Delta)$ – коэффициент корреляции соседних ЭИ по строке для ОУ с i -ой ЭПР, Δ – шаг дискретизации, $1/\alpha^{(i)}$ – интервал корреляции, $m^{(i)}$ – среднее значение i -ой ЭПР, $\{\xi_k^{(i)}\}$ – последовательность случайных величин, распределенных по гауссовскому закону ($\xi_k^{(i)} \sim N[\xi_k^{(i)} | 0, \sigma^{(i)2}]$) с нулевым математическим ожиданием, дисперсией $\sigma^{(i)2}$ и δ -образной корреляционной функцией.

На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма, основанного на модели системы со случайной скачкообразной структурой и включающего в себя многоэтапные параллельные алгоритмы обнаружения и распознавания распределенных объектов.

На этапах обнаружения объектов-кандидатов и исключения ложных объектов используются: параметрический метод классификации топографических объектов со сглаживанием достаточной статистики [8] и метод обнаружения и группировки ДЦО распределенных объектов на основе вычисления поля локальных контрастов и последующей его обработки [9, 10]. На этапе распознавания используется структурно-корреляционный метод, основанный на параллельной обработке результатов обнаружения РО, вычислении локальных и структурных признаков объектов и их сравнении с эталонными значениями [11]. Синтезированный алгоритм автоматизированного обнаружения и распознавания обеспечивает устойчивость к помехам и геометрическим искажениям благодаря простой формализации эталонов; позволяет однозначно определить тип и ракурс объекта; имеет конечное число операций, зависящее от базы данных эталонов и требуемой точности определения ракурса, что обуславливает гибкость и динамичность составных алгоритмов.

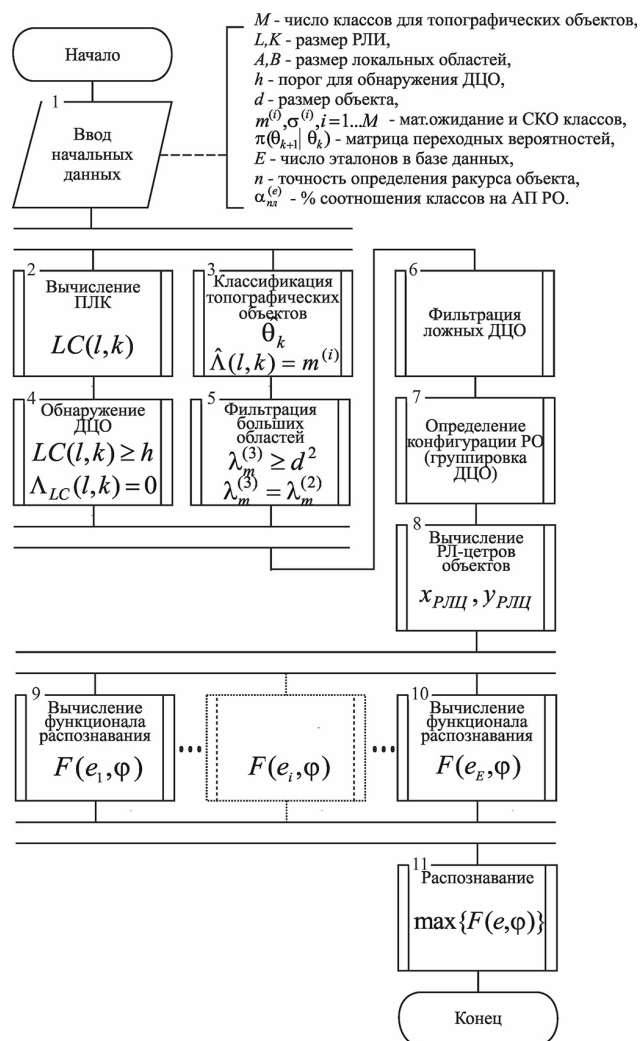


Рис. 6. Упрощенная блок-схема алгоритма автоматического обнаружения и распознавания объектов на радиолокационных изображениях

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

В качестве показателей эффективности разработанных алгоритмов в данной статье используются вероятности правильного обнаружения P_{no} и правильного распознавания P_{np} , а также быстродействие алгоритма.

Исследование эффективности алгоритмов классификации топографических объектов (рис. 6, операция 3) проводилось методом статистического моделирования. Точность выделения границ однородных участков алгоритмом классификации топографических объектов составляет 1–2 ЭИ, вероятность пропуска ОУ с размерами более 3×3 ЭИ составляет величину менее 0,01. Применение

классифицированного РЛИ при обнаружении комбинированным алгоритмом (рис. 6, операции 2–8) позволило существенно снизить уровень ложной тревоги. Так, при разности средних значений яркостей ЭИ фона и объекта 60–100, вероятность ложной тревоги при обнаружении равна нулю (без снижения вероятности правильного обнаружения), при разности менее 20 – единице.

Исследование эффективности алгоритма распознавания (рис. 6, операции 9–11) проводилось на основе обработки моделей РЛП четырех типов авиационной техники (Ил-62, Ту-134, Ил-76 и А-50), в зависимости от условий наблюдения. Вероятность правильного распознавания составила 0,68–0,96. По реальным РЛИ с пятью типами авиационной техники вероятность правильного распознавания до класса составила 1,0, до подкласса – не менее 0,84, до типа – не менее 0,68.

Кроме того, были получены приведенные на рис. 7 зависимости вероятности правильного обнаружения (а) и распознавания (б) от числа ложных объектов (обнаруженных и распознанных, соответственно) на 1 км².

При значении $P_{no} = 1$ на рис. 7, а, детектором 1 [9] обнаруживается порядка 125 шт/км² ложных объектов. Использование детектора 2 [12] приводит к повышению уровня ложных тревог до 185 шт/км². Применение рассматриваемого обнаружителя ДЦО объектов, с последующей их группировкой (кривая 3) [10], позволяет снизить число ложных объектов до 30 шт/км². Применение классификации топографических объектов при обнаружении снижает вероятность ложной тревоги до

76 %. Дальнейшее снижение уровня ложной тревоги возможно за счет применения текстурных и фрактальных признаков [13].

Результаты (рис. 7, б) исследования эффективности работы существующего (кривая 2) [14] и рассматриваемого в статье (кривая 1) алгоритмов распознавания объектов на реальных РЛИ показывают, что снижение числа неправильно распознанных объектов объясняется использованием в качестве признака типа объекта соотношения классов, характеризующего конфигурацию объектов и статистические свойства их РЛП. Количество ложных объектов составляет менее 1 шт/км², а вероятностные характеристики представленного алгоритма превосходят характеристики существующих систем распознавания не менее чем на 12,9 %.

Хорошая структурированность, параллельность и многоэтапность представленного алгоритма автоматизированного обнаружения и распознавания позволили провести эксперимент по дешифрированию реальных РЛИ вычислительными системами с 1, 8 и 16 процессорами. Зависимость времени дешифрирования РЛИ размером более 8000×7000 ЭИ и разрешением 1,5 м от количества используемых процессоров, числа классов топографических объектов и количества эталонов, представлена на рис. 8.

Результаты эксперимента показали, что временные затраты на обработку РЛИ существенно повышаются при увеличении числа классов топографических объектов и значительно возрастают при увеличении числа эталонов. Так, для решения вышеуказанной

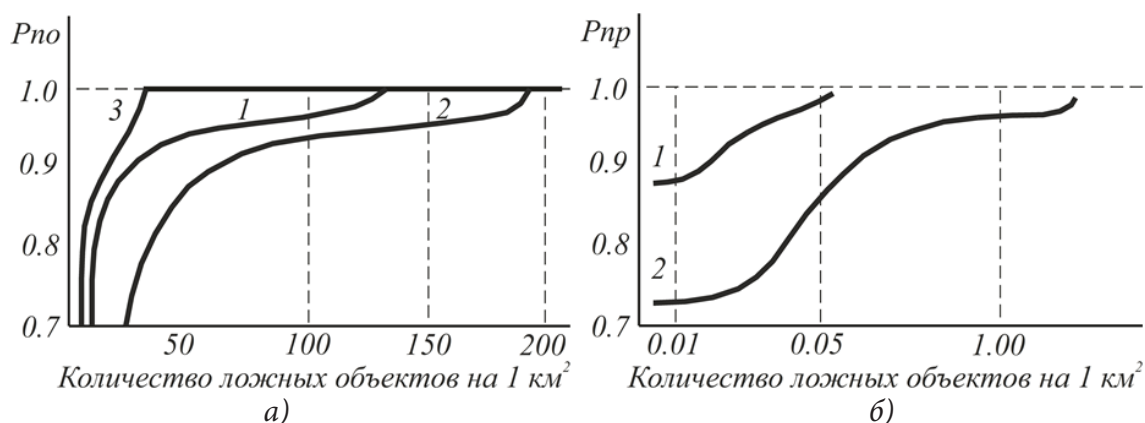


Рис. 7. Характеристики обнаружения (а) и распознавания (б)

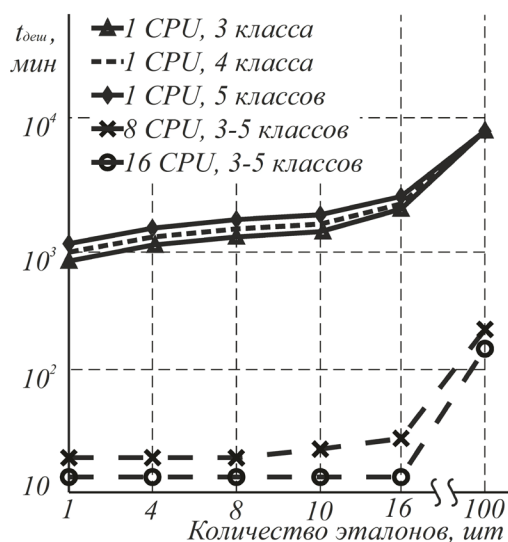


Рис. 8. Временные затраты на дешифрирование РЛИ

задачи на ЭВМ с одним процессором, увеличение числа классов топографических объектов на единицу ведет к увеличению времени обработки в среднем в 1,1–1,2 раза, а при увеличении числа эталонов в 2 раза время обработки возрастает в 1,2–1,7 раза. Однако на распознавание одного объекта, с увеличением числа эталонов, требуется в соответствующее число раз большее время. Следует также отметить, что при превышении числа эталонов общего числа физических процессоров в системе, время распознавания начинает возрастать, что связано с накладными расходами операционной системы на отображение логических процессов на физические процессоры. Увеличение числа классов топографических объектов не приводит к увеличению временных затрат при исследуемом числе классов, меньшем, чем число физических процессоров в системе.

Оценка вычислительных затрат представленного алгоритма производилась при тех же условиях, что и эксперимент. Суммарное число условных операций с плавающей запятой составило 841×10^9 , с учетом распараллеливания процессов – 421×10^9 , с использованием распараллеливания и рекурсии – $168,3 \times 10^9$. Расчетное время дешифрирования РЛИ составило 10,2 мин., что меньше экспериментальной оценки на время $\Delta t = 3$ мин. Такая разница определяется дополнительными затратами на технические операции и обмен

данными. Величину $\Delta t_{\text{тех.оп.}} = 29,4$ % следует учитывать при оценке времени обработки по предложенной методике. Вычислительные затраты на одновременную обработку нескольких РЛИ, полученных на разных длинах волн, возрастают пропорционально числу каналов РСА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная специфика изображений, полученных с помощью РСА, затрудняет и, чаще всего, делает невозможным применение традиционных методов автоматизированной обработки РЛИ. Это, в свою очередь, приводит к необходимости применения системного подхода к созданию моделей и алгоритмов автоматического дешифрирования объектов на РЛИ.

Современные системы обработки данных способны обнаруживать и распознавать на РЛИ тысячи наземных объектов с вероятностью 0,85–0,98. При этом вычислительные системы состоят из десятков-сотен процессоров, обеспечивающих производительность обработки радиолокационных сигналов и цифровых данных $2,5 \times 10^9$ операций в секунду. Однако задача устойчивого и эффективного дешифрирования объектов на РЛИ решена лишь частично, в рамках узкой специфики таких систем.

Анализ результатов оценки времени обработки реальных РЛИ позволил сформулировать основные требования к организации процесса дешифрирования. Обработку радиолокационных снимков большого размера целесообразно производить на многопроцессорных параллельных вычислительных системах, при этом оператору следует конкретизировать район мониторинга, уточнять число классов объектов и количество эталонов в зависимости от поставленных задач. Окончательное решение о классе (типе) объекта необходимо возложить на оператора с возможностью проведения самостоятельного инструментального анализа РЛП распределенного объекта.

При обработке РЛИ, полученных с помощью многодиапазонных РСА, помимо энер-

гетических характеристик необходимо учитывать текстурные и фрактальные свойства и особенности изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А. В. Системный анализ / А. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 2004. – 454 с.
2. Вапник В. Н. Теория распознавания образов / В. Н. Вапник, А. Я. Червоненкис. – М. : Наука, 1974. – 416 с.
3. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский [и др.]. Под ред. П. И. Дудника. – М. : ВВИА, 2006. – 1112 с.
4. Анфиногенов А. Ю. К вопросу моделирования радиолокационного портрета движущегося объекта / А. Ю. Анфиногенов, А. Н. Тонких // Труды X Международного симпозиума «Метод дискретных особенностей в задачах математической физики МДОЗМФ-2003», 2003. – С. 19–25.
5. Кузнецов В. А. Структура и свойства наземных объектов на изображениях РСА в задачах распознавания / В. А. Кузнецов // Телекоммуникации. – 2012. – № 10. – С. 31–38.
6. Lee J. S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images / J. S. Lee // SPIE. International Conference on Speckle. – 1985. – Vol. 556. – P. 1034–1051.
7. Клекис Э. А. Оптимальное обнаружение скачкообразных изменений структуры дискретных динамических систем по незашумленным наблюдениям / Э. А. Клекис // Статистические проблемы управления. – Вильнюс : Ин-т матем. и киберн. АН ЛитССР, 1986. – Вып. 73. – С. 89–99.
8. Кузнецов В. А. Выделение малоразмерных объектов алгоритмами сегментации на основе модели системы со случайной скачкообразной структурой / В. А. Кузнецов, А. Н. Малов, Б. М. Миронов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 89–92.
9. Достовалов М. Ю. Исследование методов автоматического обнаружения объектов на РЛ-изображениях / М. Ю. Достовалов, А. С. Лифанов, Т. Г. Мусинянц // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 6. – С. 14–27.
10. Кузнецов В. А. Автоматическое обнаружение распределенных объектов на когерентно-локационных изображениях с учетом априорных данных / В. А. Кузнецов, А. Н. Малов, Б. М. Миронов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32. – № 4. – С. 417–422.
11. Кузнецов В. А. Автоматическое распознавание объектов на изображениях когерентного локатора / В. А. Кузнецов, Б. М. Миронов // Материалы научной сессии МИФИ. – 2009. – Т. 2. – С. 199.
12. Novak L. M. Effects of polarization and resolution on SAR ATR / L. M. Novak, S. D. Halversen, G. J. Owirka // IEEE Trans. Aerospace and electronic systems. – 1997. – Vol. 33. – No. 1. – P. 102–115.
13. Кузнецов В. А. Метод измерения направленной морфологической мультифрактальной сигнатуры текстуры изображений / В. А. Кузнецов, А. Н. Потоцкий // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – № 3. – С. 39–52.
14. Novak L. M. The automatic target-recognition system in SAIP / L. M. Novak, G. J. Owirka, W. S. Brower, A. L. Weaver // The Lincoln laboratory journal. – 1997. – Vol. 10. – No. 2. – P. 187–201.

Кузнецов Виктор Андреевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж).
E-mail: kuzzviktor@mail.ru

Марюхненко Виктор Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения.
E-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

Миронов Борис Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматики, телемеханики и связи, Иркутский государственный университет путей сообщения.
E-mail: mironov_bm@irgups.ru

Потоцкий Антон Николаевич – младший научный сотрудник, Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина (г. Воронеж).
E-mail: AntonPototskiy@mail.ru

Kuznetsov Viktor Andreevich – Candidate of Technical Science, Senior Teacher at the Air Force Academy, Voronezh.
E-mail: kuzzviktor@mail.ru

Maryuhnenko Viktor Sergeevich – Doctor of Technical Science, Full Professor, Professor at the Department of Automation, Telemechanics and Communications, Irkutsk State Transport University.
E-mail: viktor.maryuhnenko@yandex.ru

Mironov Boris Mihajlovich – Candidate of Technical Science, Docent, Associate Professor at the Department of Automation, Telemechanics and Communications, Irkutsk State Transport University.
E-mail: mironov_bm@irgups.ru

Pototsky Anton Nikolaevich – Research Assistant of Air Force Academy, Voronezh.
E-mail: AntonPototskiy@mail.ru