

К.С. СОБОЛЕВ, А.Б. ЛАРИНА

**Алгоритм выделения объектов на  
цветных аэрофотоснимках с  
использованием преобразования  
Меллина**

УДК 004.931, 004.932

ФГБУН  
Научный  
геоинформационный  
центр Российской  
академии наук

*В работе рассмотрена задача распознавания транспортных средств на цифровых аэрофотоснимках. В качестве основного рабочего метода используется алгоритм, основанный на преобразовании Фурье-Меллина (ФМ).*

### **Вступление**

Технологии регистрации и интерпретации фото- и видеоинформации - системы «компьютерного зрения» (КЗ) повсеместно применяются в современной технике бытового и специального назначения. Автоматическое распознавание, пространственный поиск, а также определение характеристик наблюдаемых объектов – вот далеко не полный список возможностей систем КЗ.

Необходимо отметить, что методика решения задач КЗ зависит от большого числа факторов, таких как: подбор информационного материала об интересующих нас объектах; сложность, в том числе вычислительная, реализации алгоритма КЗ в данной архитектуре системы регистрации.

Методы морфологического анализа [4] позволяют эффективно производить поиск объектов на цветных и монохромных изображениях, используя понятие «форма» изображения.

Форму изображения можно построить как вручную, так и с помощью автоматических процедур на базе обучающей выборки. В настоящий момент развиты методы построения нечеткой и случайной формы морфологического объекта [4]. В зависимости от поставленных задач могут строиться системы КЗ, сохраняющие свой-

ство инвариантности наблюдения относительно яркостных, аффинных и других преобразований.

Подход, применяемый в данной работе, позволил достичь инвариантности к углу поворота и изменению масштаба эталонного изображения. Алгоритмическое построение формы объекта отсутствовало, так как свойство инвариантности задано самим преобразованием ФМ[2].

### Постановка задачи

Задача распознавания транспортных средств была поставлена и изучена в рамках темы «Разработка методов геоинформационного обеспечения для оценки состояния автомагистралей»[1]. Была проанализирована возможность применения преобразований Фурье – Меллина в качестве алгоритма распознавания транспортных средств на аэрофотоснимках.

Пусть задано изображение  $f(x, y)$ ; двумерное преобразование Фурье – Меллина изображения  $f(x, y)$  есть комплексно-значная функция  $M_f(k, \nu)$  двух аргументов - целого  $k$  и вещественного  $\nu$ :

$$M_f(k, \nu) = \frac{1}{2\pi} \iint_{R^2} f(x, y) (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}(\sigma+k-2-i\nu)} (x+iy)^{-k} dx dy, \quad (1)$$

Параметр  $\sigma$  – произвольная положительная константа (её значение фиксировано с самого начала, будем считать, что  $\sigma = 0.5$ ). Она вводится для того, чтобы гарантировать сходимость данного двойного интеграла в начале координат. На бесконечности этот интеграл сходится, т.к.  $f(x, y) \equiv 0$  вне некоторого прямоугольника. Заметим, что это преобразование определено и в том случае, если функция  $f(x, y)$  - комплекснозначная.

В полярных координатах интеграл (1) преобразуется следующим образом:

Пусть  $x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi$ , т.е.  $r = \sqrt{x^2 + y^2}, \varphi = \arg(x + iy)$  тогда

$$M_f(k, \nu) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{+\infty} f_0(\varphi, r) \cdot r^{\sigma-1-i\nu} e^{-ik\varphi} dr$$

(заметим, что функция  $f_0(\varphi, r) = f(r \cos \varphi, r \sin \varphi)$  периодична по первому аргументу с периодом  $2\pi$ ).

Напомним, что сама функция  $f_0$  восстанавливается по её преобразованию Фурье– Меллина с помощью формулы

$$f_0(\varphi, r) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \sum_{k=-\infty}^{\infty} M_f(k, \nu) \cdot r^{-\sigma+i\nu} \cdot e^{ik\nu} \right) d\nu$$

**Теорема.** Если  $M_f(k, \nu)$  – преобразование Фурье – Меллина изображения  $f$ , и изображение  $g$  получено из  $f$  гомотетией относительно начала координат с положительным коэффициентом  $\lambda$  и поворотом вокруг того же начала координат на угол  $\alpha$ . Тогда преобразование Фурье – Меллина изображения  $g$  равно

$$M_g(k, \nu) = \lambda^{\sigma-i\nu} e^{-k\alpha} \cdot M_f(k, \nu)$$

т.е. отличается только комплексным множителем, зависящим от  $k, \nu, \alpha, \lambda$  (и  $\sigma$ , естественно).

В качестве меры близости двух множеств  $F$  и  $G$  в любом метрическом пространстве  $X$  с метрикой, общепринятой считается метрика Хаусдорфа, которая определяется так:

$\delta(F, G) = \max(\rho(F, G); \rho(G, F))$ , где  $\rho(F, G)$  – расстояние от множества  $F$  до множества  $G$ :

$$\rho(F, G) = \sup_{x \in F} \inf_{y \in G} d(x, y).$$

Заметим, что если плоские компактные множества  $F$  и  $G$  заданы в декартовых координатах своими характеристическими функциями  $f(x, y)$  и  $g(x, y)$ , то

$$\rho(F, G) = \max_{f(x_1, y_1)=1} \min_{g(x_2, y_2)=1} \sqrt{(x_1-x_2)^2 + (y_1-y_2)^2},$$

а в полярных координатах:

$$\rho(F, G) = \max_{f_0(\varphi_1, r_1)=1} \min_{g_0(\varphi_2, r_2)=1} \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

В качестве меры отклонения  $\delta(M_1(k, \nu); M_2(k, \nu))$  преобразования  $M_1$  от преобразования  $M_2$  можно взять квадрат нормы разности этих преобразований в пространстве Фурье-Меллина:

$$\delta(M_1(k, \nu); M_2(k, \nu)) = \|M_1(k, \nu) - M_2(k, \nu)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{k \in Z} |M_1(k, \nu) - M_2(k, \nu)|^2 \right) d\nu, \quad (2)$$

Таким образом, нам надо найти минимум

$$\delta(F, G) = \min_{\alpha, \lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{k \in Z} |\lambda^{\sigma-i\nu} e^{-ik\alpha} \cdot M_f(k, \nu) - M_g(k, \nu)|^2 d\nu \right)$$

## Инварианты Фурье-Меллина

Однако вместо самих преобразований Фурье – Меллина выгодней рассматривать их полные инварианты.

Для преобразования

$$M_{f_o}(k, \nu) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{+\infty} f_o(\varphi, r) \cdot r^{\sigma-1-i\nu} e^{-ik\varphi} dr$$

Рассмотрим функцию тех же аргументов

$$I_f(k, \nu) = \left( M_f(0;0) \right)^{-1 + \frac{i\nu}{\sigma}} \cdot e^{-ik \cdot \arg\left( M_f(1;0) \right)} \cdot M_f(k, \nu), \quad (3)$$

Докажем, что (3) образует систему полных инвариантов относительно поворотов и растяжений, т.е. что если образ  $G$ , задаваемый функцией  $g_o(\varphi, r) = f_o(\varphi - \alpha, r/\lambda)$ , то  $I_{g_o}(k, \nu) = I_{f_o}(k, \nu)$ .

В самом деле,  $M_g(k, \nu) = \lambda^{\sigma-i\nu} e^{-ik\alpha} \cdot M_f(k, \nu)$ , в частности,

$$M_g(0;0) = \lambda^{\sigma} \cdot M_f(0;0),$$

$$M_g(1;0) = \lambda^{\sigma} e^{-i\alpha} \cdot M_f(1;0), \text{ и}$$

$$\arg\left( M_g(1;0) \right) = \arg\left( \lambda^{\sigma} \right) + \arg\left( e^{-i\alpha} \right) + \arg\left( M_f(1;0) \right) = 0 - \alpha + \arg\left( M_f(1;0) \right).$$

Поэтому,

$$\begin{aligned} I_g(k, \nu) &= \left( \lambda^{\sigma} \cdot M_f(0;0) \right)^{-1 + \frac{i\nu}{\sigma}} \cdot e^{-ik \left( -\alpha + \arg\left( M_f(1;0) \right) \right)} \cdot \lambda^{\sigma-i\nu} e^{-ik\alpha} M_f(k, \nu) = \\ &= \lambda^{-\sigma+i\nu} \left( M_f(0;0) \right)^{-1 + \frac{i\nu}{\sigma}} \cdot e^{ik\alpha} e^{-ik \cdot \arg\left( M_f(1;0) \right)} \cdot \lambda^{\sigma-i\nu} e^{-ik\alpha} \cdot M_f(k, \nu) = \\ &= \left( M_f(0;0) \right)^{-1 + \frac{i\nu}{\sigma}} \cdot e^{-ik \cdot \arg\left( M_f(1;0) \right)} \cdot M_f(k, \nu) = I_f(k, \nu) \end{aligned}$$

Кроме того,  $M_f(k, \nu) = \left( M_f(0;0) \right)^{1 - \frac{i\nu}{\sigma}} \cdot e^{ik \cdot \arg\left( M_f(1;0) \right)} \cdot I_f(k, \nu)$ .

## Поиск объекта на цветных изображениях

В задаче поиска изображения по эталону использовался структурный алгоритм с использованием предварительного разбиения поля зрения с помощью фильтра Харриса[3].

Цветное изображение представлено 3 каналами  $(\alpha, \beta, \gamma)$ :

$$\overline{f(x, y)} = (\alpha(x, y), \beta(x, y), \gamma(x, y)), \quad (4)$$

где  $\overline{f(x, y)}$  - многоканальное изображение

$\alpha(x, y)$  - канал №1 изображения  $\overline{f(x, y)}$

$\beta(x, y)$  - канал №2 изображения  $\overline{f(x, y)}$

$\gamma(x, y)$  - канал №3 изображения  $\overline{f(x, y)}$

Определим преобразование ФМ на ограниченном поле зрения  $D$  размерами  $(\Delta_x, \Delta_y)$  и центром в точке  $(x_c, y_c)$ :

$$D: \{ |x - x_c| \leq \Delta_x, |y - y_c| \leq \Delta_y \}$$

$$\underbrace{M_f}_{D}(k, \nu) = \frac{1}{2\pi} \iint_{x, y \in D} f(x - x_c, y - y_c) (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}(\sigma - k - 2 - i\nu)} (x + iy)^{-k} dx dy, \quad (5)$$

Для цветного изображения  $\overline{f(x, y)}$  образ ФМ:

$$\overbrace{M_{\vec{f}}}(k, \nu) = \left( \underbrace{M_{f_\alpha}}_D(k, \nu), \underbrace{M_{f_\beta}}_D(k, \nu), \underbrace{M_{f_\gamma}}_D(k, \nu) \right)$$

Согласно соотношению (3) инвариант ФМ для области  $D$ :

$$\underbrace{I_{\vec{f}}}_D(k, \nu) = \left( \underbrace{M_f}_D(0, 0) \right)^{-1 + \frac{i\nu}{\sigma}} e^{-ik \arg \left( \underbrace{M_f}_D(1, 0) \right)} \underbrace{M_f}_D(k, \nu)$$

Для многоканального изображения  $\overline{f(x, y)}$  инвариант ФМ для области  $D$ :

$$\overbrace{I_{\vec{f}}}(k, \nu) = \left( \underbrace{I_{f_\alpha}}_D(k, \nu), \underbrace{I_{f_\beta}}_D(k, \nu), \underbrace{I_{f_\gamma}}_D(k, \nu) \right), \quad (6)$$

$\underbrace{I_{\vec{f}}}_D(k, \nu)$  – это матрица коэффициентов ФМ размерностью  $K * V * 3$ ,

где  $K, V$  - области интегрирования  $k$  и  $\nu$ .

В задаче поиска эталона область  $D: \{ |x - x_c| \leq \Delta_x, |y - y_c| \leq \Delta_y \}$  задается точкой  $(x_c, y_c)$  на изображении поиска  $\vec{f}$  и размером  $(\Delta_x, \Delta_y)$  эталона  $\vec{\varepsilon}$ .

Невязка изображения  $\vec{f}$  и эталона  $\vec{\varepsilon}$  для области  $D$  будет иметь вид:

$$\delta_D(\vec{f}, \vec{\varepsilon}) = \left( \sum_{k, \nu} \left| \underbrace{I_{f_\alpha}}_D(k, \nu) - I_{\varepsilon_\alpha}(k, \nu) \right|^2, \sum_{k, \nu} \left| \underbrace{I_{f_\beta}}_D(k, \nu) - I_{\varepsilon_\beta}(k, \nu) \right|^2, \sum_{k, \nu} \left| \underbrace{I_{f_\gamma}}_D(k, \nu) - I_{\varepsilon_\gamma}(k, \nu) \right|^2 \right), \quad (7)$$

$I_{f_n}^D$  - инвариант для канала  $n$  изображения  $\vec{f}$  и области  $D$

$I_{\varepsilon_n}$  - инвариант для канала  $n$  эталона  $\vec{\varepsilon}$

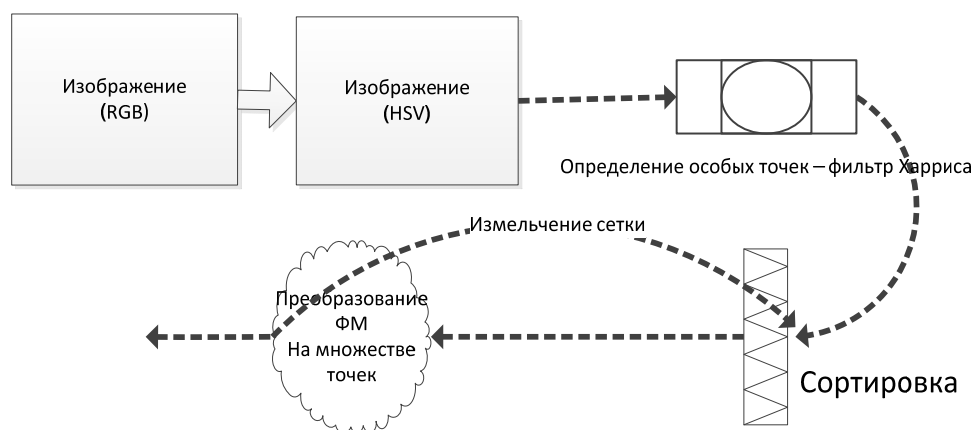


Рис. 1. Схема работы алгоритма адаптивного поиска.

### Тестирование алгоритма

Разработанный комплекс методов и алгоритмов позволил одновременно вычислять преобразование ФМ в наборе точек, заданных на плоскости снимка (рис. 1).

Алгоритм идентификации изображений в пространстве Фурье-Меллина реализует простое сравнение метрики, что значительно повышает быстродействие системы идентификации. Преимуществом данного преобразования в набор дескрипторов также является и снижение размерности данных.

В ходе исследований, в целях проведения тестирования алгоритма, была произведена экспериментальная съемка беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) участка федеральной трассы М2 Крым длиной ~22 км. Съемка выполнялась цифровой фотокамерой Canon EOS 5D Mark II с фокусным расстоянием 55 мм с двух высот: ~150 м и ~680 м с полосой захвата на местности ~112 м и ~750 м соответственно. Используемая цифровая камера имеет матрицу размером 36x24 мм, размер изображения при этом 5616x3744 пикселей. Во время срабатывания затвора фотокамеры производилось фиксирование времени, координат центра снимка и курса с помощью бортовой GPS системы.

Результаты представлены на рисунках 2,3:

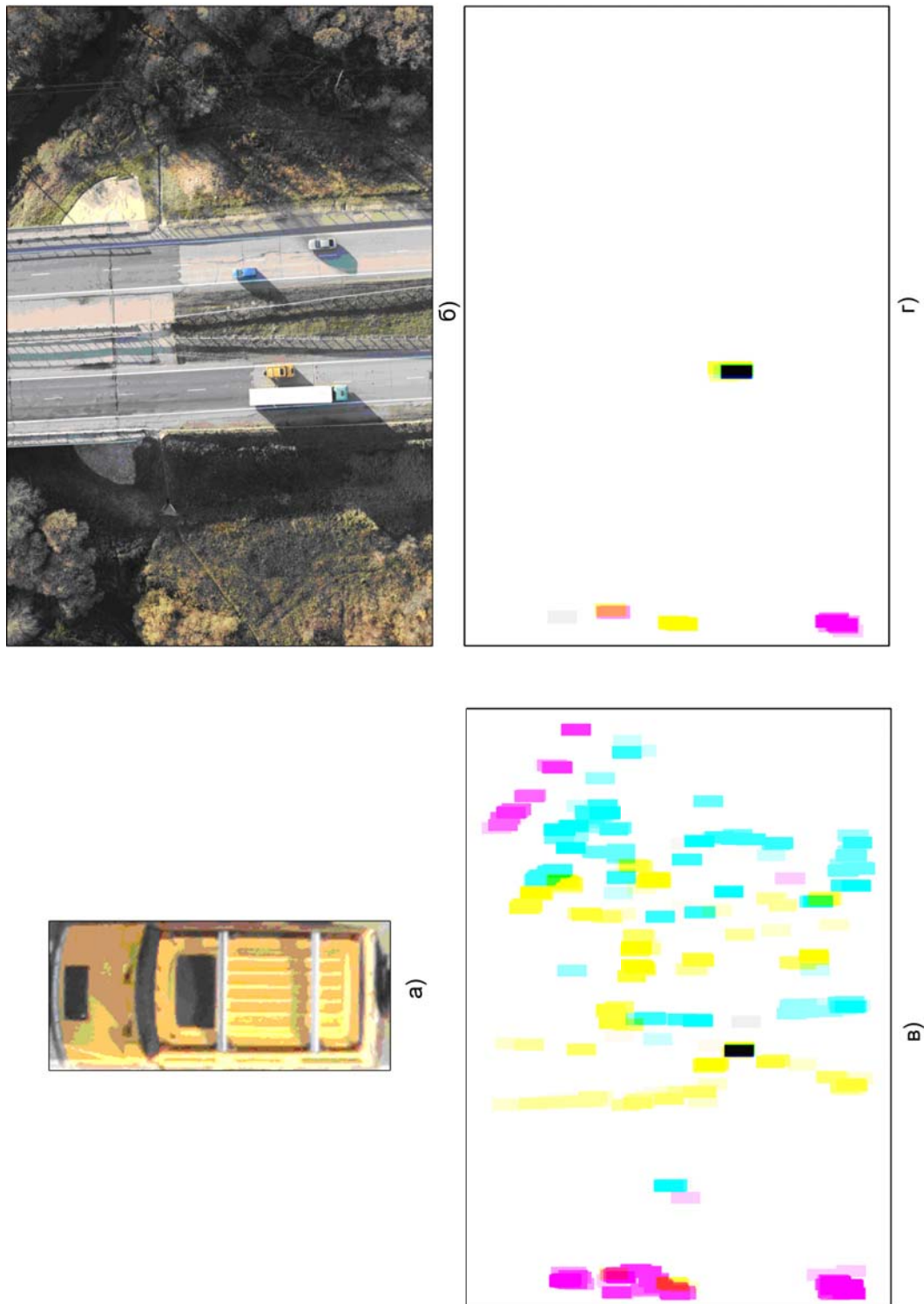


Рис. 2. Пример работы алгоритма: а) искомый объект; б) снимок для поиска; в) поиск 1 итерация; г) поиск 2 итерация.

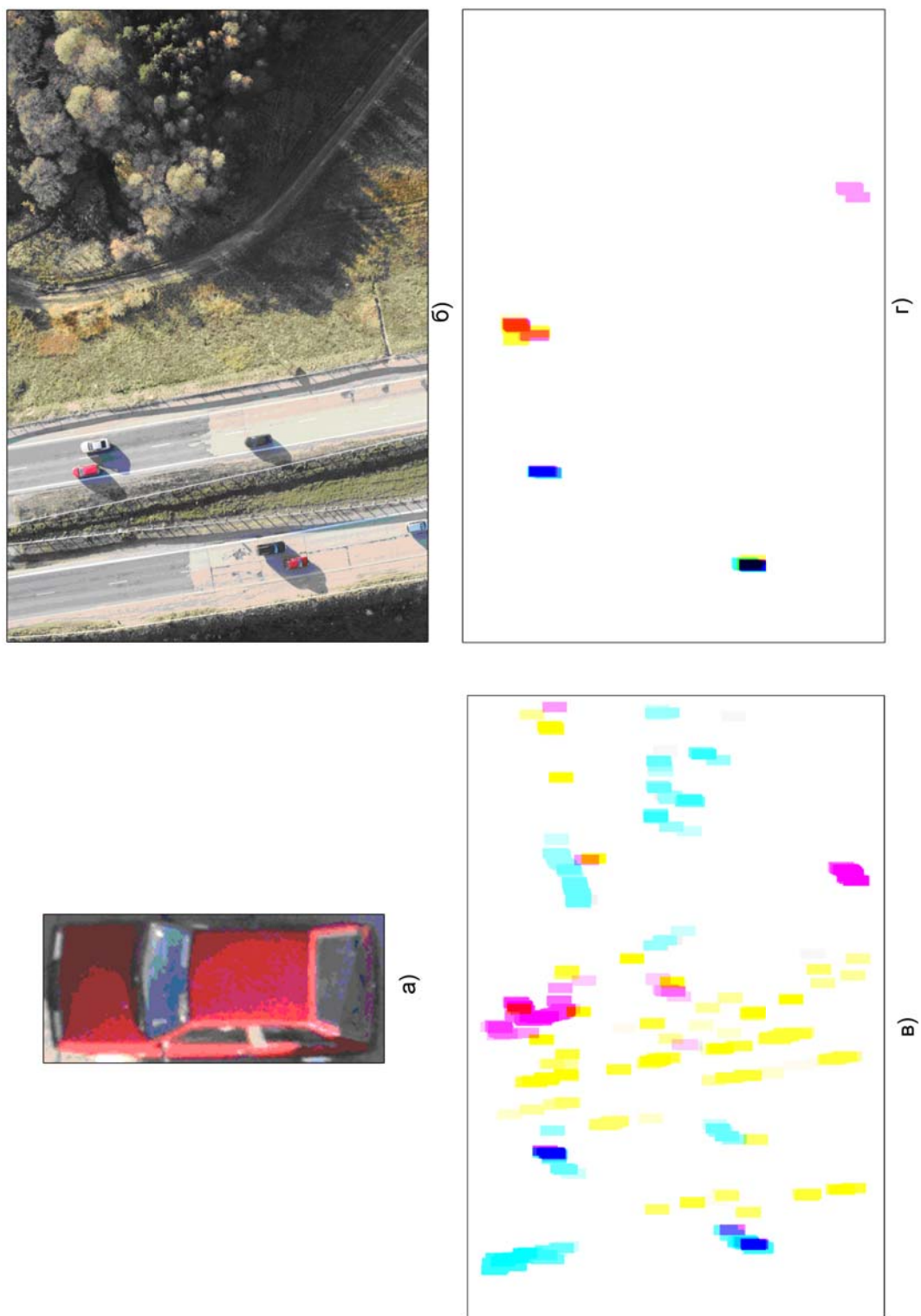


Рис. 3. Пример работы алгоритма: а) искомый объект; б) снимок для поиска; в) поиск 1 итерация; г) поиск 2 итерация.



## Выводы

Предложен и экспериментально исследован алгоритм поиска объектов на цветных изображениях высокого разрешения. Выявлено, что алгоритм обладает устойчивостью к поворотам и изменению масштаба. Цветовая чувствительность алгоритма позволяет эффективно различать объекты близкие по морфологической форме.

Предлагаемый алгоритм может быть использован для оперативного выделения, идентификации и поиска различных объектов в навигации, робототехнике, системах безопасности.

## Литература

1. *Лебедев В.В. и др.* Проблемы создания региональных геоинформационных комплексов и опыт решения прикладных задач на основе аэрокосмической информации. – М.: Наука, 2002.
2. *Casasent. D., Psaltis. D.* New Optical Transforms for Pattern Recognition Proceedings IEEE Jan. 1977; Volume: 65 , Issue: 1
3. *C. Harris and M. Stephens.* "A combined corner and edge detector," in Fourth Alvey Vision Conf., pp. 147-151(1988)
4. *Чуличков А.И., Пытьев Ю.П.* Методы морфологического анализа изображений [Книга]. - Москва: Физматлит, 2010.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

СОБОЛЕВ К.С. [KSOBOLEV@NM.RU](mailto:KSOBOLEV@NM.RU),

ЛАРИНА А.Б. [LARINA.ANNA@MAIL.RU](mailto:LARINA.ANNA@MAIL.RU),

ТЕЛ. +7(495)691-27-23