

УДК 004.932

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИОННОГО СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ КОМБИНИРОВАННОГО ВИДЕНИЯ

*Елесина С.И., доцент кафедры «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», e-mail: elesinas@mail.ru;*

*Ломтева О.А., аспирант кафедры «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», e-mail: olomteva@gmail.com.*

## RESEARCH OF THE CORRELATION IMAGES COMBINING ALGORITHMS IN COMBINED VISION SYSTEMS

*Elesina S.I., Lomteva O.A.*

*The authors research global optimization method – genetic algorithm with the aim to receive its optimum parameters values while it being used in combined vision systems has been carried out. Extended angles of virtual terrain model are supposed to decrease the computational complexity of the correlation combining images algorithm. This approach considerably reduces the number of virtual images generated for combining.*

**Keywords:** global extremum, criterion function, search area, genetic algorithm, step-by-step scanning, images pyramid, combined vision systems, parameters of aircraft positioning, real image, virtual image.

**Ключевые слова:** биполярный сигнал, метод Эйлера-Коши, фильтрация, нелинейный фильтр, цифровое моделирование.

### Введение

Повышение безопасности и эффективности полетов на различных типах летательных аппаратов (ЛА) требует разработки новых решений в области авионики, направленных на улучшение ситуационной информированности экипажа. Вследствие этого в последнее время одной из наиболее актуальных задач авиатехники стало создание систем комбинированного видения (Combined Vision System – CVS), которые представляют собой комбинацию подсистем искусственного видения (Synthetic Vision System – SVS) и улучшенного видения (Enhanced Vision System – EVS). Важной функцией таких комбинированных систем технического зрения является совмещение реальных изображений (РИ), сформированных бортовой камерой ЛА, и виртуальных изображений (ВИ), синтезированных с учетом текущего положения ЛА на основе цифровой карты местности (ЦКМ). Результат такого совмещения гораздо более информативен для летчика, чем исходные изображения, наблюдаемые им по отдельности. В результате повышается степень ситуационной осведомленности экипажа, что ведет к снижению аварийности пилотирования, экономии топлива и ресурсов ЛА. Кроме того, совмещение реального и виртуального изображений позволяет осуществлять корректировку координат ЛА [1, 2].

И реальное, и виртуальное изображения можно охарактеризовать с помощью следующих 6 параметров позиционирования: высота  $h$ , широта  $\varphi$ , долгота  $\lambda$ , крен  $\gamma$ , курс  $\psi$ , тангаж  $\theta$ . Для ВИ перечисленные параметры известны. Для РИ эти параметры имеют погрешности из-за неточной работы навигационного оборудования.

*Проведены исследования метода глобальной оптимизации – генетического алгоритма с целью получения оптимальных значений его параметров при использовании в системах комбинированного видения. Для уменьшения вычислительной сложности данного алгоритма корреляционного совмещения изображений предлагается использовать расширенные ракурсы виртуальной модели местности. Данный подход значительно сокращает количество генерируемых для совмещения виртуальных изображений.*

Таким образом, сравнивая РИ и ВИ, можно получить более точные текущие параметры позиционирования, а по ним – текущие координаты ЛА.

Общая схема совмещения изображений и коррекции координат ЛА системой комбинированного видения представлена на рис. 1 и заключается в следующем.

От сенсоров системы технического зрения (СТЗ) РИ поступает на блоки «Предварительная обработка». Работа блоков такого типа основана на том, что обрабатываемые РИ содержат избыточную информацию, устранение которой не влечет за собой снижения вероятности и точности совмещения. Сокращение исходной информации посредством снижения информативности изображений является одним из способов уменьшения объема вычислений и увеличения вероятности правильного корреляционного совмещения изображений. РИ может быть различной физической природы в зависимости от СТЗ (телевизионное, тепловизионное, радиолокационное).

С другой стороны по навигационным и пилотажным данным (параметрам позиционирования ЛА) по ЦКМ формируется ракурс виртуальной модели местности (ВММ) – виртуальное изображение (ВИ), которое также проходит предварительную обработку. Обработка изображений (реальных и виртуальных) носит совершенно разный характер для совмещения и визуализации. В первом случае это поиск общих характерных элементов, по которым реальные и виртуальные изображения мож-

но совместить; во втором – наиболее эффективный способ визуализации итогового комбинированного изображений [3].

В блоке «Совмещение» выполняется корреляционное совмещение двух РИ и ВИ, а именно вычисляется функционал сравнения, в частности, взаимно-корреляционная функция данной пары изображений, и определяется экстремум полученного функционала сравнения (рис. 2).

Наибольшую вычислительную сложность имеет подсистема поиска экстремума функционала сравнения. Причем вычислительная сложность поиска экстремума в значительной степени зависит от типа критериальной (целевой) функции (функционала сравнения). Так как реальное и виртуальное изображения являются бинарными, то наиболее предпочтительными являются парные критериальные функции. В работах [4, 5] приведен тщательный анализ и отбор лучших парных критериальных функций для решения поставленных задач. Наиболее качественной функцией, демонстрирующей наилучшие результаты, является парная функция Рао (1), и именно она используется в данной работе.

$$K = \frac{a}{a+b+c+e}, \quad (1)$$

где значение  $a$  соответствует совпадению черных пикселей на сравниваемых изображениях,  $e$  соответствует совпадению белых пикселей на сравниваемых изображениях,  $b$  и  $c$  – пиксели на изображениях, имеющие различную яркость: белую и черную, черную и белую соответственно.

Целью данной работы является исследование методов поиска глобального экстремума (ГЭ) целевой функции (ЦФ) при корреляционном совмещении РИ и ВИ, а также поиск путей повышения их быстродействия.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

- 1) отбор и практическая реализация подходящих для решения рассматриваемой задачи методов поиска ГЭ ЦФ при корреляционном совмещении РИ и ВИ;
- 2) проведение серии экспериментов для исследования работы методов поиска ГЭ ЦФ и получения оптимальных настроек их параметров;
- 3) сравнение эффективности работы методов поиска ГЭ ЦФ и выбор наилучшего среди них;
- 4) дальнейшее уменьшение вычислительной сложности метода поиска ГЭ ЦФ, выбранного в качестве наилучшего.

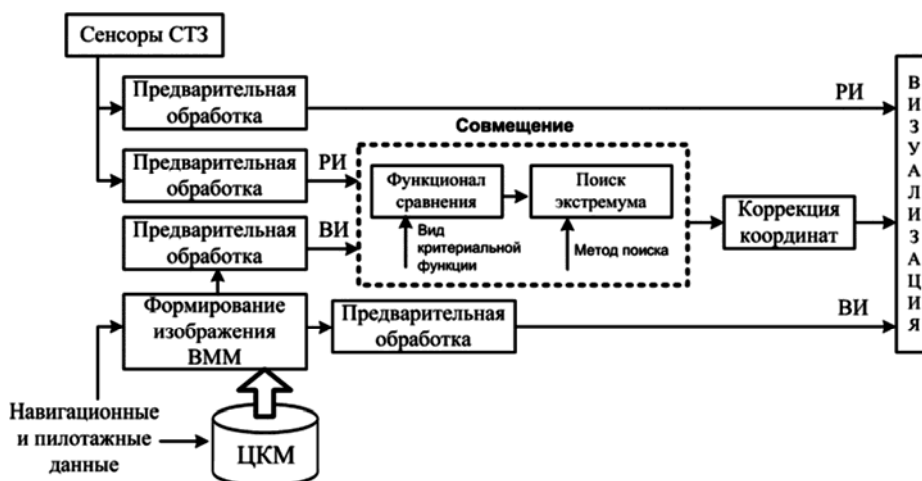


Рис. 1. Общая схема совмещения изображений и коррекции координат системой комбинированного видения ЛА

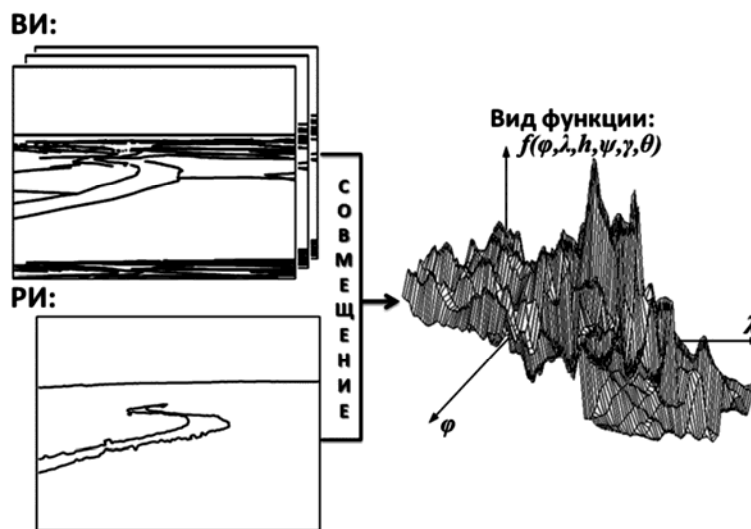


Рис.2. Вид проекции на координаты  $\lambda$  и  $\varphi$  многоэкстремальной ЦФ при совмещении изображений по шести параметрам позиционирования ЛА

Существует множество различных методов поиска ГЭ. Наиболее простым и надежным является метод полного перебора всех возможных ВИ (ракурсов ВММ) и РИ. Такой метод дает очень хорошие результаты по точности совмещения. Однако этот метод в чистом виде непригоден для использования в системах комбинированного видения, так как в общем случае приходится проводить корреляционное совмещение изображений в шестимерном пространстве  $D$  по шести степеням свободы: широта, долгота, высота, крен, курс, тангаж:  $D = \varphi \cdot \lambda \cdot h \cdot \gamma \cdot \psi \cdot \theta$ . Если число переборных дискретных значений по координатам равно десяти, а по углам равно пяти, то при полном переборе необходимо построить  $N = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 5 = 125\ 000$  вариантов ракурсов изображения ВММ и столько же раз выполнить совмещение, что невозможно в условиях реального времени.

Для сокращения трудоемкости поиска ГЭ значения каждого параметра позиционирования можно перебирать с некоторым шагом  $h > 1$ , а затем произвести уточнение найденного таким образом экстремума, «сканируя» его окрестность с единичным шагом по каждому измерению. Это так называемый метод *позатипного сканирования*.

Метод поэтапного сканирования можно дополнительно оптимизировать, используя «пирамиду» изображений (рис. 3), то есть работая с изображениями различных масштабов на каждом этапе сканирования (уровне пирамиды). Уменьшенный в несколько раз масштаб изображения на верхнем уровне пирамиды (первом этапе) значительно сокращает количество точек, что приводит к ускорению работы алгоритма корреляционного совмещения [6].

Перечисленные методы являются детерминированными, т.к. при поиске экстремума ни разу не используются случайные значения его параметров. Хотя данные методы и обеспечивают высокую точность нахождения ГЭ, трудоемкость их слишком велика, поскольку они пассивны, «слепе» проходят зону поиска и не учитывают никакой информации, получаемой в ходе работы.

От проблем детерминированных алгоритмов позволяют уйти стохастические алгоритмы, в работе которых присутствует элемент случайности. Примером таких алгоритмов являются эволюционные алгоритмы, в частности, их разновидность – *генетический алгоритм (ГА)*.

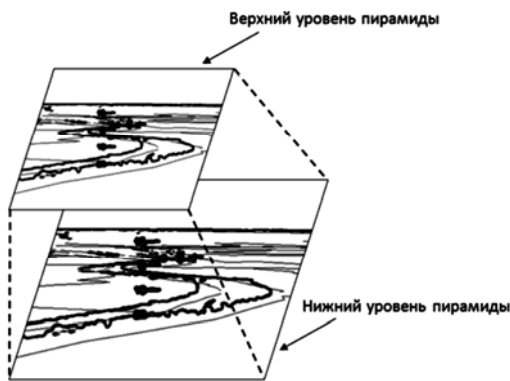


Рис. 3. Пирамида изображений

Проведенные сравнительные испытания показали, что ГА отличается высокой скоростью работы по сравнению с методом поэтапного сканирования и методом, использующим пирамиду изображений, и при этом он не уступает им по точности полученных результатов (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость вероятности попадания в ГЭ от трудоемкости для различных методов поиска ГЭ

Поэтому для решения поставленной задачи следует применять именно ГА, а дальнейшие исследования необходимо направить на поиск оптимальных настроек данного алгоритма, а также способов уменьшения его трудоемкости. С этой целью предлагается использование расширенных ракурсов ВММ при совмещении РИ и ВИ. Они получаются путем исключения двух параметров позиционирования ЛА (тангажа и курса) и увеличения линейных размеров каждого отдельно взятого ракурса (ВИ).

Принцип построения расширенных ракурсов заключается в следующем. Поле зрения расширяется, как показано на рис. 5, по вертикали и по горизонтали с учетом интервалов неопределенности углов тангажа и курса соответственно [3].

Для расчета размера сторон расширенного ракурса ВММ (рис. 5) используются формулы (2) и (3):

$$W_x = X \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0 + 2\Delta\psi}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2}\right)}, \quad (2)$$

$$W_y = Y \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1 + 2\Delta\theta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}, \quad (3)$$

где  $X, Y$  – размеры реального изображения.

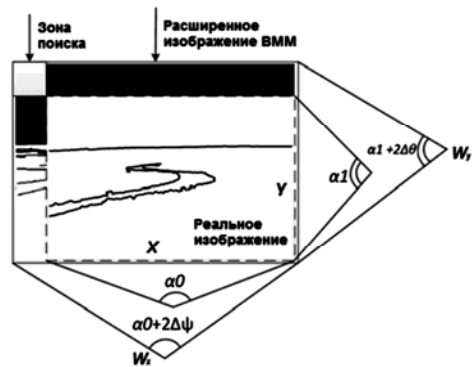


Рис. 5. Размеры расширенного изображения ВММ относительно реального изображения

## Генетический алгоритм

Идеи ГА позаимствованы у природы [7, 8]. Они основаны на генетических процессах живых организмов: биологические популяции развиваются в течение нескольких поколений, подчиняясь законам естественного отбора по принципу «выживает наиболее приспособленный». Подражая этому процессу, ГА способны «развивать» решения реальных задач, закодированных соответствующим образом. ГА используют для своей работы эволюционные принципы наследственности, изменчивости и естественного отбора. Общая схема ГА в теории и в приложении к данной предметной области представлена на рис. 6.

ГА работает с некоторым случайным набором исходных решений, называемых *популяцией особей*, в хромосоме (генотип) каждой из которых закодировано возможное решение задачи (фенотип).

Для решения задачи совмещения изображений с помощью ГА её параметры необходимо представить в виде генов особи. Это значения шести параметров позиционирования ЛА: широта, долгота, высота, курс, крен и тангаж. Поскольку мы имеем дискретное пространство поиска, т.е. каждый параметр задачи может принимать лишь отдельные допустимые значения, то целесообразно выбрать вещественное кодирование хромосом. Каждая хромосома будет состоять из шести отдельных вещественных чисел (генов), которые соответствуют параметрам позиционирования конкретного ВИ (особи).

Изначально популяция формируется случайным образом (блок «Инициализация популяций решений» на рис.6). Оценивание качества закодированных решений производится с помощью функции приспособленности (ЦФ), в роли которой выступает парная критериальная

функция (КФ) Рао (блок «Оценивание особей» на рис. 6). По результатам оценивания наиболее приспособленные особи выбираются (блок «Селекция» на рис. 6) для скрещивания.

В результате скрещивания выбранных особей посредством применения генетического оператора *кроссинговера* создается потомство, генетическая информация которого формируется в результате обмена хромосомной информацией между родительскими особями (блок «Скрещивание» на рис. 6).

Созданные потомки формируют новую популяцию, причем часть потомков мутирует (используется генетический оператор *мутации*), что выражается в случайном изменении их генотипов (блок «Мутация» на рис. 6). Оператор мутации необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствует защите алгоритма от преждевременной сходимости. В данной задаче мутация изменяет значения отдельных генов (параметров позиционирования) особей на другие, случайно взятые из множества их допустимых значений.

Перечисленная последовательность действий называется *поколением*. Эволюция популяции состоит из последовательности таких поколений. Результат эволюции – определение ГЭ.

Результат работы ГА во многом зависит от настройки его параметров: количество поколений, размер популяции, тип селекции, давление селекции, разновидность оператора кроссинговера, вероятность кроссинговера  $P_c$ , разновидность оператора мутации, вероятность мутации  $P_m$ .

Для уменьшения трудоемкости ГА используется кластеризация области поиска [5, 9]. Допустимый размер кластера определяется расстоянием между локальными экстремумами.

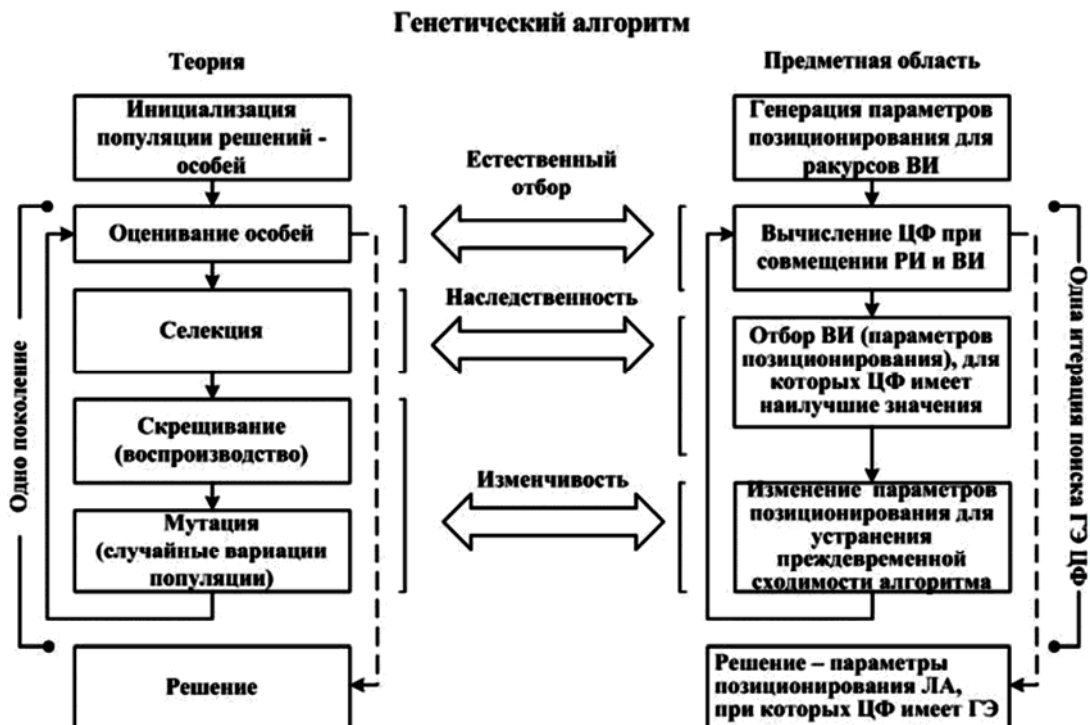


Рис. 6. Общая схема ГА

**Экспериментальные исследования**

При генерации ракурсов ВММ в ходе исследования работы ГА приняты следующие пределы и шаги изменения поправок к навигационным данным:

- по широте  $\varphi$  и долготе  $\lambda$ : в интервале [-32; 32] с шагом 16  
(-32, -16, 0, 16, 32) – 5 возможных значений;
- по высоте  $h$ : в интервале [-32; 32] с шагом 8  
(-32, -24, -16, -8, 0, 8, 16, 24, 32) – 9 возможных значений;
- по крену  $\gamma$ : в интервале [-0.2; 0.2] с шагом 0.2  
(-0.2, 0, 0.2) – 3 возможных значения;
- по курсу  $\psi$ : в интервале [-1; 1] с шагом 0.5  
(-1, -0.5, 0, 0.5, 1) – 5 возможных значений;
- по тангажу  $\theta$ : в интервале [-0.2; 0.2] с шагом 0.1  
(-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2) – 5 возможных значений.

При этом общее число вариантов ракурсов равно  $5 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 = 16875$ , каждый ракурс занимает 469 Кбайт дискового пространства, а их общий размер составляет около 7,55 Гб. Таким образом, обеспечивается достаточная точность оценки навигационных параметров, и при этом объем полученной базы данных ракурсов позволяет хранить ее на жестком магнитном диске.

**Определение оптимальных параметров ГА**

Для нахождения оптимальных для решаемой задачи настроек ГА были проведены эксперименты, разбитые на серии в зависимости от параметров ГА. Число экспериментов в каждой серии – 300. Размеры РИ и ВИ одинаковы и составляют 800×600 пикселей.

На рис. 7 представлена зависимость вероятности попадания в ГЭ от количества поколений и размера популяции.

Исходя из данного рисунка, можно сделать вывод, что в дальнейшем целесообразно выбирать размер популяции не менее 500 особей и количество поколений не менее 20, чтобы вероятность попаданий в ГЭ превышала 0,95.

Исследования показали, что чем больше вероятность скрещивания и мутации, тем лучшие результаты показывает алгоритм. Для достижения попадания в глобальный экстремум с вероятностью больше 0,95 необходимо выбирать  $P_c$  и  $P_m$ , равными 0,1-0,3 и 0,03-0,05 соответственно.

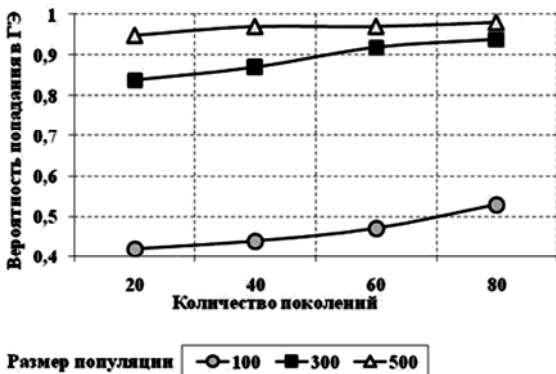


Рис. 7. Зависимость вероятности попаданий в ГЭ от количества поколений и размера популяции

Результаты экспериментов для трех видов селекции приведены на рис.8 (при размере популяции 500, количестве поколений 20,  $P_c = 0,25$  и  $P_m = 0,05$ ).

Из диаграммы видно, что худшие показатели имеет рулеточная селекция (вероятность не более 0,87), а лучшие – селекция усечением (вероятность до 0,95).

Результат совмещения реального и виртуального изображений методом ГА представлен на рис. 9.

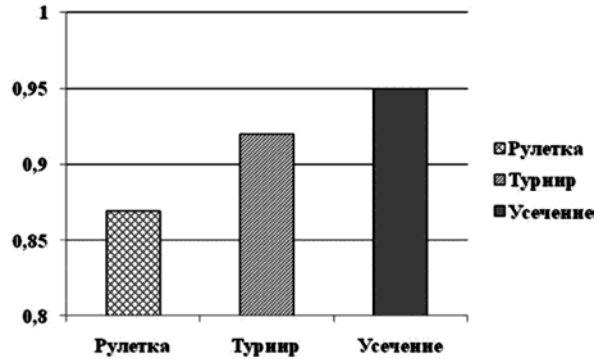


Рис. 8. Зависимость вероятности попаданий в ГЭ от различных типов селекции



Рис. 9. Результат совмещения РИ и ВИ с использованием ГА

**Исследование эффективности применения расширенных ракурсов ВММ**

Размеры сторон расширенных ракурсов ВММ вычислялись по формулам (2) и (3). В качестве погрешностей  $\Delta\psi$  и  $\Delta\theta$  использовались предельно возможные ошибки по данным координатным осям, соответствующие  $1^\circ$  и  $0,2^\circ$  соответственно. Углы зрения телекамеры  $\alpha_1$  и  $\alpha_0$  равны  $20^\circ \times 30^\circ$ . Размер РИ равен 800×600 пикселей. При этом размер расширенного ракурса составил 856×612 пикселей.

Таким образом, размер зоны поиска РИ на расширенном ВИ (рис. 5) составил 56×12 пикселей (672 возможных вариантов). Прохождение данной зоны можно осуществлять с некоторым шагом (метод сканирования). Экспериментально установлено, что оптимальными являются следующие шаги сканирования: 8 по ширине и 2 по высоте. Тогда количество вызовов ЦФ при прохождении зоны поиска сократится в 16 раз.

На рис. 10 представлены графики зависимости вероятности попадания в ГЭ от трудоемкости (количества

построенных ВИ) ГА при использовании обычных и расширенных ракурсов ВММ. Видно, что метод использования расширенных ракурсов так же, как и первый метод, обеспечивает высокую вероятность попадания в ГЭ (около 92 %), но при этом генерируется почти в 20 раз меньше ВИ.

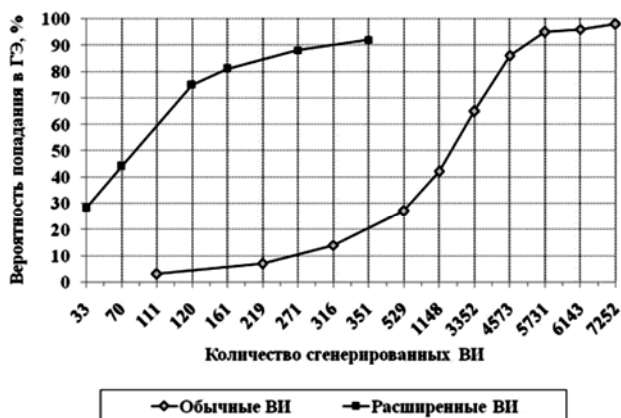


Рис. 10. Зависимость вероятности попадания в ГЭ от трудоемкости ГА при использовании обычных и расширенных ракурсов ВММ

## Заключение

Исходя из полученных результатов исследования, оптимальными настройками ГА для решения задачи совмещения реального и виртуального изображений в комбинированных системах видения являются:

- 1) длительность эволюции (количество поколений): не менее 20;
- 2) размер популяции: не менее 500;
- 3) интенсивность (давление) селекции: 0,3;
- 4) разновидность оператора кроссинговера: двухточечный для вещественного кодирования;
- 5) вероятность кроссинговера  $P_c$ : 0,1-0,3;
- 6) разновидность оператора селекции: усечение;
- 7) вероятность мутации  $P_m$ : 0,03-0,05.

Использование данных параметров ГА обеспечивает достаточно высокую вероятность попадания в ГЭ: более 0,95 (в случае, если РИ и ВИ визуальны схожи).

Рассмотренный метод использования расширенных ракурсов ВММ приводит к отказу от перебора значений углов тангажа и курса при рендеринге изображения

ВММ, т.к. все изменения, вносимые этими углами при определенном наборе других навигационных параметров, включены в расширенный ракурс ВММ. В результате значительно сокращается количество используемых ракурсов ВММ и, следовательно, повышается быстродействие ГА.

## Литература

1. Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Проблемные аспекты системы комбинированного видения летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 5. С. 61-65.
2. Логинов А.А., Муратов Е.Р., Никифоров М.Б., Новиков А.И. Сокращение вычислительной сложности совмещения изображений в авиационных системах технического зрения // Динамика сложных систем. 2015. Т. 9, № 1. С. 33-40.
3. S. Elesina, O. Lomteva. Increase of image combination performance in combined vision systems using genetic algorithm // Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing. – Budva, Montenegro.– 2014. PP. 158-161.
4. M. Nikiforov, S.Elesina, A.Efimov, "Criterial Functions Selection for Combined and Enhanced Synthetic Vision Systems of the Aircraft," Computer Science and Information Technologies: Materials of the VIIth International Scientific and Technical Conference CSIT 2013. Lviv: Publishing Lviv Polytechnic, 2013.С. 56-58.
5. Елесина С.И., Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Монография // Под ред. Костяшкина Л.Н., Никифорова М.Б. – М.: Радиотехника, 2015. 208 с.
6. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
7. Цой Ю.Р., Спицын В.Г. Генетический алгоритм: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 146 с.
8. M. Mitchell, An Introduction to Genetic Algorithms, 5th ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.С. 103-131.
9. Елесина С.И., Никифоров М.Б. Повышение эффективности генетического алгоритма // Информационные технологии: теоретический и прикладной научно-технический журнал. 2012. № 3. С. 49-54.