

СИНТЕЗ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМ ВООРУЖЕНИЕМ В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ

В. А. Кузнецов, Д. В. Табырца

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Поступила в редакцию 20.09.2016 г.

Аннотация. В работе кратко рассмотрены исторические тенденции развития систем управления авиационным вооружением. При этом явно прослеживается объем и скорость поступления данных, подлежащих обработке пилотом при наведении управляемой ракеты на цель. Кроме того, обеспечиваемая высокая точность поражения наземных целей с помощью телевизионных систем наведения с одной стороны, и отсутствие возможности наведения в условиях преднамеренных помех с другой стороны, обуславливают противоречие и актуальность темы работы. Для его разрешения авторами представлена оригинальная методика функционально-структурного синтеза новой модели системы управления на основе результатов трехэтапной декомпозиции подсистем и их функционального, операционно-процедурного и структурного анализа. На основе логически связанных результатов анализа выявлен возможный вариант реализации автоматического способа наведения управляемой ракеты на цель – путем модификации одного из самых быстрых и эффективных алгоритмов – SURF на основе вейвлет-преобразования. Результаты оценки временных и точностных характеристик алгоритмов используются для доказательства высокой эффективности синтезированной модели системы управления авиационным вооружением.

Ключевые слова: системный анализ, синтез, вейвлет-преобразование, дескриптор, обнаружение, опознавание, объект.

Annotation. In this paper we briefly discuss the historical development trend of air weapons control systems. This is clearly seen the volume and speed of data receipt to be processed at the pilot hover guided missile at the target. In addition, it ensures high accuracy of ground targets destroy with the help of television guidance systems on the one hand, and the lack of guidance opportunities in jamming on the other hand, cause controversy and relevance of the work theme. For his permission authors presents an original method of functional-structural synthesis of a new model based on the results of a three-stage control system decomposition of subsystems and their functional, operational and procedural and structural analysis. On the basis of coherent analysis of the results revealed a possible embodiment of the method of automatic guided missile guidance to the target – by modifying one of the fastest and most efficient algorithms – the SURF based on wavelet transform. The evaluation time and accuracy characteristics of algorithms are used to prove the high performance synthetic model aircraft fire control system.

Keywords: system analysis, synthesis, wavelet transform, descriptor, detection, identification, object.

ВВЕДЕНИЕ

В течение продолжительного временного периода оснащение самолета составляло артиллерийское, бомбардировочное и неуправляемое ракетное вооружение. Систе-

ма управления авиационным вооружением (СУАВ) ограничивалась лишь набором простейших органов управления и исполнительных механизмов. Все действия, связанные со сбором необходимых сведений об объектах противника (целях) и условиях применения вооружения, с выбором варианта применения авиационных средств поражения

(АСП) и реализацией выбранного варианта в атаке возлагались на экипаж. Повышение эффективности вооружения обеспечивалось модернизацией АСП и расширением функциональных возможностей визиров, работающих в различных диапазонах длин электромагнитных волн. При этом увеличилось объем и скорость поступления данных, что существенно понизило быстродействие экипажа и, в конечном счете, снизило точность выполнения боевых задач. Оснащение самолета управляемым ракетным вооружением дополнило множество задач управления самолетом управлением предстартовой подготовкой, пуском ракет и целеуказанием (наведением). Существенно усложнился процесс организации взаимодействия СУАВ с многообразием АСП, а необходимость их согласованного функционирования привела к формированию множества перекрестных связей, созданию согласующих устройств, коммутаторов и блоков связи. Таким образом, СУАВ обладает всеми признаками сложной системы, поскольку отличается сложностью структуры и многообразием внешних и внутренних связей. При этом адекватным инструментом исследования СУАВ является системный анализ [1, 2, 3].

Несмотря на несомненный прогресс развития СУАВ, основным проблемным вопро-

сом их функционирования был и остается вопрос снижения влияния психофизиологических особенностей пилотов на эффективность СУАВ. Кроме того, с развитием систем управления, каналов управления и передачи данных совершенствуются и системы радиоэлектронной борьбы (РЭБ), противодействующие эффективному решению боевых задач по уничтожению целей. Так, в общем случае, производится подавление каналов управления и передачи данных, ставятся помехи различного целевого назначения.

Существующая необходимость снижения влияния человека на точность наведения управляемых АСП (УАСП) и обеспечения управления АСП в условиях подавления каналов управления приводит к целесообразности создания новой модели СУАВ с автоматическим режимом наведения УАСП [1, 4].

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СУАВ

В общем случае, комплекс авиационного вооружения (КАВ), в который входит СУАВ, представляет собой многоуровневую иерархическую структуру с замкнутыми информационными процессами. Схема, представленная на рис. 1, отражает возможность выполнения комплексом заданных функций – от сбора исходных данных до плани-

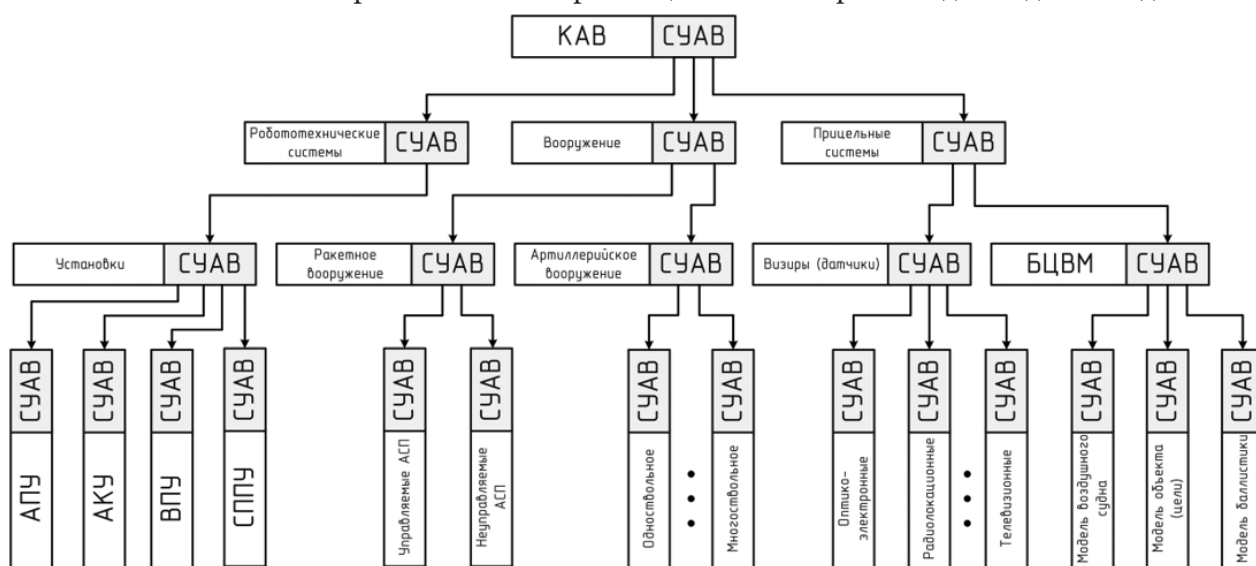


Рис. 1. Схема многоуровневой иерархической структуры КАВ (БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина, АПУ – авиационная пусковая установка, АКУ – авиационная катапультная установка, ВПУ – встраиваемая пушечная установка, СППУ – самолетная подвесная пушечная установка)

рования атаки и от принятия решения на реализацию атаки до формирования команд исполнительным устройствам.

Структура иллюстрирует не энергетические или конструктивные, а функциональные связи, которые объединяют множество автономных подсистем в единую функционирующую систему. Реализацию этих связей, обеспечение организационного применения всех составных частей КАВ осуществляет СУАВ. Анализ схемы позволяет сделать вывод о том, что СУАВ является объединением систем управления всех иерархических уровней и повторяет структуру КАВ. Вершина многоуровневой иерархической структуры представляет интересы КАВ в целом [2, 3].

В классическом понимании системного анализа [3] можно представить этапы его выполнения: декомпозиция сложной технической системы на подсистемы с определением их статических и динамических характеристик, их анализ и синтез модели новой, более эффективной системы структурными, функциональными, параметрическими или другими методами. Вследствие сложности рассматриваемой системы, повторяющей структуру

КАВ, в данной работе предлагается оригинальная методика трехэтапного системного анализа. На первом этапе для исследования СУАВ в процессе наведения УАСП необходимо обозначить типы целей, по которым предполагается применение УАСП, информационные подсистемы, размещенные на самолете, типы УАСП, а также рассмотреть воздействующие факторы и существующие ограничения, обусловленные особенностями применения АСП и складывающейся обстановкой на театре военных действий (рис. 2).

Предположим, что основными целями являются наземные объекты: промышленные сооружения, мосты, аэродромы, боевая техника и т. п. Для сохранения самолета-носителя УАСП уничтожение таких объектов должно производиться на больших дальностях без преодоления зоны противовоздушной обороны (ПВО) противника. Также необходимо учитывать, что в условиях боевых действий противник использует средства РЭБ для непрерывного подавления каналов связи, управления и передачи информации.

Представленная на рис. 2 декомпозиция рассмотренных факторов, ограничений,

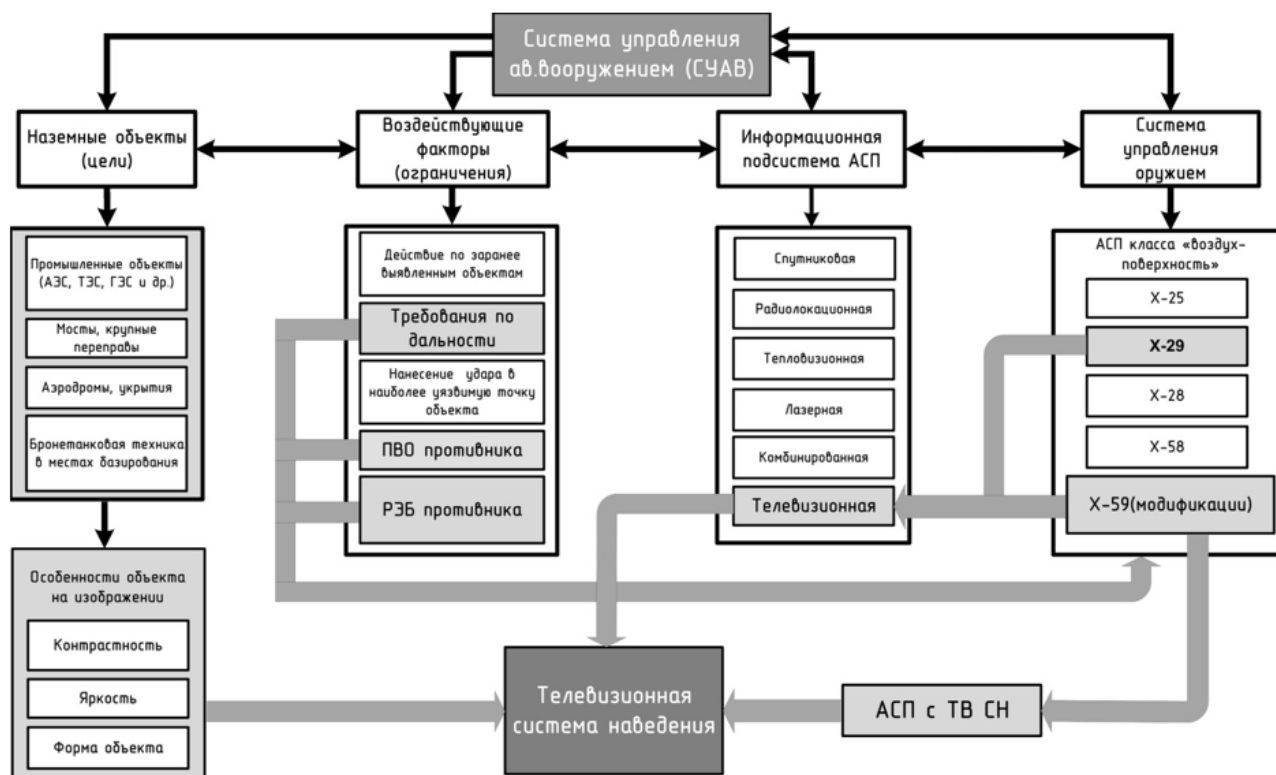


Рис. 2. Результат декомпозиции СУАВ и функционального анализа ее компонент

АСП, информационных подсистем и результат их функционального анализа позволяют сделать вывод, что единственно возможным АСП в таких условиях является управляемая ракета с телевизионным принципом наведения. При этом все интересующие объекты в видимом диапазоне обладают контрастностью и формой, что позволяет выделять их на фоне подстилающей поверхности в телевизионной системе наведения (ТВ СН).

На втором этапе системного анализа производится декомпозиция выделенной телевизионной системы наведения на функциональные компоненты и проводится ее операционно-процедурный анализ. Как видно из представленной на рис. 3 схемы, технические характеристики и особенности УАСП обеспечивают немаловажный вклад в общую эффективность выполнения боевой задачи W [4, 5]. Рассмотрение условий применения и методов наведения позволило прийти к выводу о повышении вероятности преодоления ПВО вероятного противника при использо-

вании ракет класса «воздух-поверхность» с ТВ СН.

Анализ способов наведения УАСП позволил выявить основной недостаток ТВ СН – коррекцию траектории ракеты на конечном этапе наведения осуществляет человек. Влияние человеческого фактора на эффективность СУАВ характеризуется вероятностными характеристиками обнаружения, своевременного и безошибочного управления [4, 5].

Своевременность решения задачи в человеко-машинной системе оценивается вероятностью того, что стоящая перед системой задача будет решена за время T_{mp} , не превышающее располагаемое T_p :

$$P_t = p\{T_{mp} \leq T_p\} = \Phi\left(\frac{T_p - T_{mp}}{\sigma_t}\right), \quad (1)$$

где T_{mp} , T_p – требуемое и располагаемое время для реализации управляющего алгоритма соответственно; Φ – функция Лапласа; σ_t – среднеквадратическое отклонение случайных величин T_{mp} , T_p . Величина времени T_p опре-

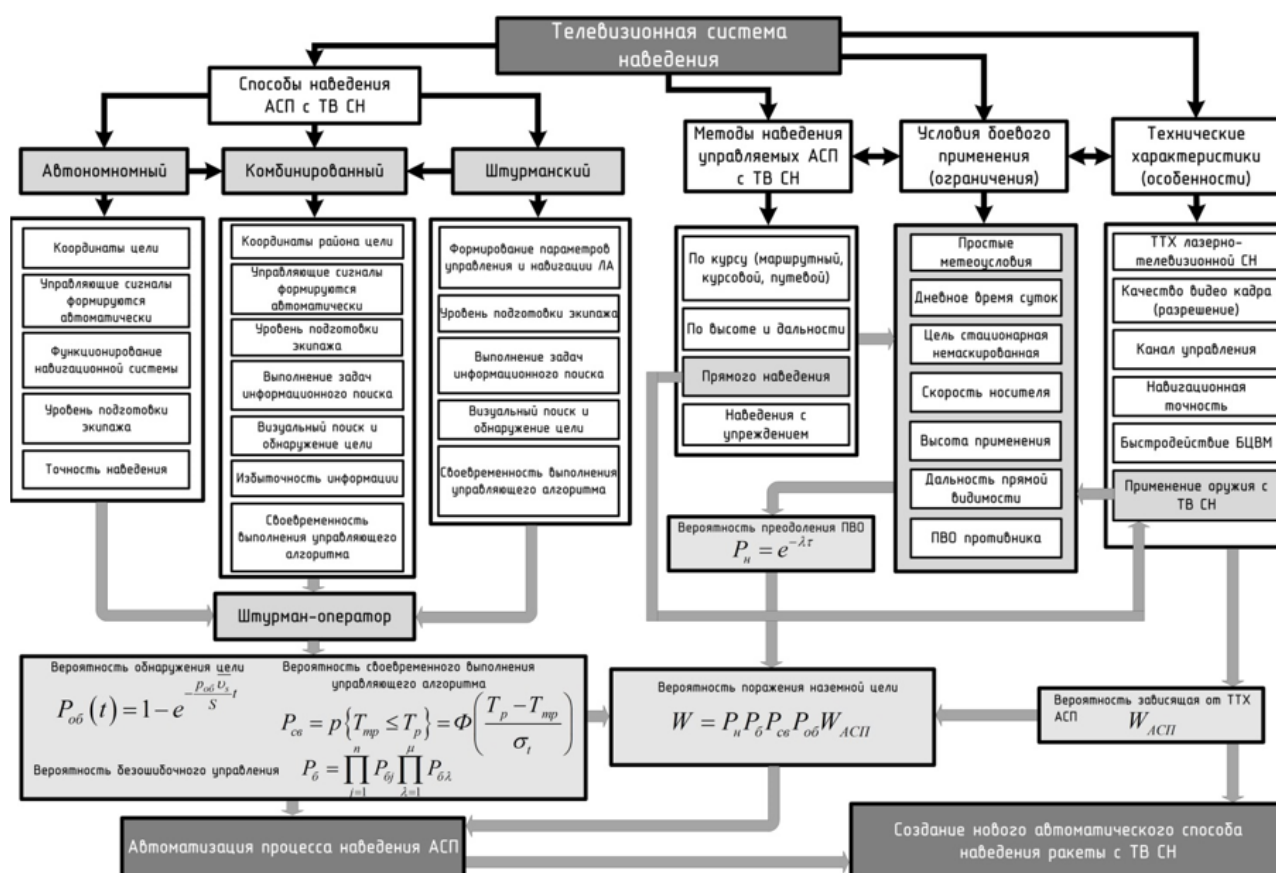


Рис. 3. Результат декомпозиции ТВ СН и операционно-процедурного анализа ее компонент

деляется условиями боевого применения: скоростью полета самолета, дальностью до цели и минимальной дальностью пуска ракет класса «воздух-поверхность» [5]. Требуемое время реализации управляющего алгоритма оценивается с помощью сетевого графика выполнения всего комплекса работ по наведению УАСП, построенного по методике [5]. В таком случае учитывается способность человека совмещать во времени некоторые перцептивные мыслительные и двигательные процессы, а также невозможность одновременного выполнения работ, обладающих близкой психологической структурой.

Вероятность безошибочной реализации алгоритма управления во многом зависит от коэффициента загрузки оператора K_z , представляющего собой отношение времени, необходимого оператору для выполнения данного действия с максимально возможной скоростью, ко времени, реально располагаемому человеком, может быть определена следующим образом:

$$K_z = T_{mp} / T_p. \quad (2)$$

Вероятность безошибочной реализации всего многошагового процесса управления вычисляется как произведение вероятностей безошибочной реализации элементарных операций [5]:

$$P_o = \prod_{j=1}^n P_{oj} \prod_{k=1}^{\mu} P_{ok}, \quad (3)$$

где P_{ok} – вероятность безотказной работы технических средств СУАВ при выполнении k -го элемента управляющего алгоритма; μ – общее число работ, выполняемых аппаратной частью СУАВ.

Если считать поток успешных выстрелов (пусков) по самолету простейшим, то вероятность непоражения самолета будет подчиняться показательному закону:

$$P_n = e^{-\lambda \tau}, \quad (4)$$

где λ – средняя интенсивность потока поражающих выстрелов; τ – время нахождения самолета в зоне поражения противником.

Таким образом, необходимость уменьшения времени τ с целью увеличения вероятности непоражения обуславливает дополни-

тельные ограничения на располагаемое время.

Следует учитывать, что пилот осуществляет поиск наземной цели на заданной местности, поэтому для оценки вероятностных характеристик процесса визуального поиска может быть выбран последовательный поиск с равномерным законом распределения координат точки обзора. Вероятность обнаружения цели в этом случае равна:

$$P_{ob}(t) = 1 - e^{-\frac{P_{ob} \bar{v}_s t}{S}}, \quad (5)$$

где P_{ob} – условная вероятность обнаружения цели при условии, что она находится на осматриваемом участке местности, $\bar{v}_s$ – средняя скорость обзора, S – площадь района, в котором находится цель.

С учетом рассмотренных компонент, обобщенный показатель эффективности СУАВ – вероятность поражения наземного объекта W можно вычислить по формуле:

$$W = P_{ob} P_n P_b P_t \bar{W}, \quad (6)$$

где $\bar{W}$ – условная вероятность поражения наземной цели, зависящая только от характеристик АСП.

Для оценки эффективности используемой в настоящее время СУАВ проведен расчет вероятностей (1–5) и обобщенный показатель эффективности СУАВ (6) [5]. В результате анализа приведенных на рис. 4 и 5 графиков выявлены следующие особенности и недостатки существующей СУАВ:

- необходимость визуального обнаружения объекта пилотом приводит к значительному увеличению требуемого времени подготовки АСП к применению;
- диапазон скоростей современных самолетов обуславливает время нахождения в зоне возможного применения АСП единицы-десятки секунд, что не всегда позволяет реализовать алгоритм подготовки УАСП к применению и их применение с первого захода;
- применение АСП со второго и более заходов значительно повышает вероятность поражения бомбардировщика наземными ПВО противника;
- увеличение времени поиска и распознавания наземной цели ведет к значительному

снижению показателя эффективности, особенно на малых начальных дальностях поиска цели, обусловленных большими величинами ошибок наведения (рис. 4);

– значение показателя эффективности снижается на 18–20 процентов при дальностях более половины максимальной дальности применения АСП и более чем на 50 процентов на интервале $D_{\max} / 2 \dots D_{\min}$ (рис. 5).

Таким образом, при малых дальностях пуска УАСП негативный вклад в эффективность СУАВ оказывает человек, а для ее повышения необходимо уменьшить время поиска, обнаружения и локализации наземных целей, увеличить дальность обнаружения и локализации за счет автоматизации решения задачи наведения УАСП (рис. 3).

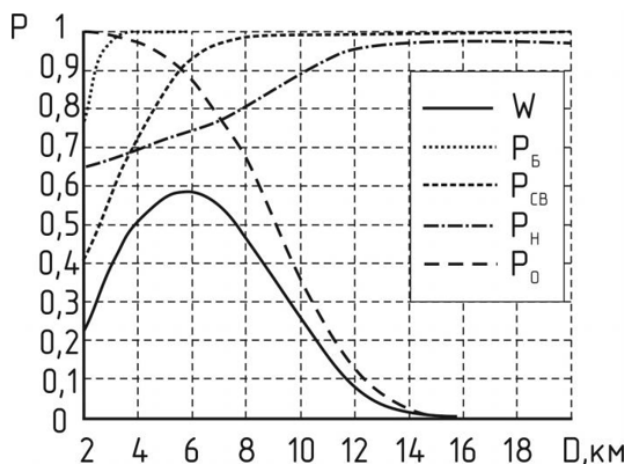


Рис. 4. Зависимость обобщенного показателя эффективности СУАВ W и его составляющих от дальности до цели

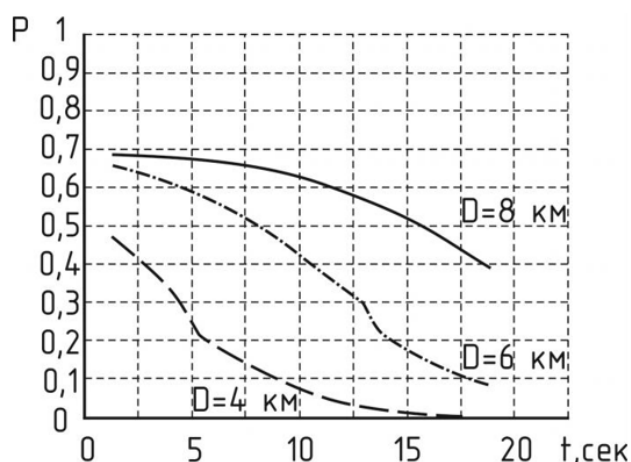


Рис. 5. Зависимости обобщенного показателя эффективности СУАВ от времени распознавания цели

На третьем, заключительном этапе системного анализа рассматривается ТВ система, расположенная непосредственно на управляемом АСП (рис. 6). Анализ характеристик используемых ТВ камер выявил существенный их недостаток – низкое качество изображения, определяемое соответствующими параметрами [6, 7]. Результаты исследования условий съемки и ТВ изображений показывают, что объекты на них могут иметь: различный масштаб, яркость и контраст, находиться в произвольном месте кадра или отсутствовать вовсе. Изображение может быть подвержено искажениям и помехам. Кроме того, изображение является лишь двумерной проекцией трехмерного объекта, поэтому изменение ракурса объекта и угла визирования кардинальным образом влияют на его двумерную проекцию, то есть на изображение.

Результаты анализа существующих методов обработки и анализа изображений позволили выявить ряд алгоритмов на основе вейвлет-преобразования, инвариантных к условиям наблюдения, при этом существующие многопроцессорные вычислительные системы позволяют обрабатывать видеопотоки в реальном масштабе времени [8, 9].

Таким образом, системный подход к исследованию СУАВ позволил обосновать необходимость функционального синтеза модели СУАВ, включающей в себя новый способ наведения АСП по ТВ изображению, минимизирующий влияние человеческого фактора на процесс наведения и исключающий вероятность подавления каналов связи и управления АСП. При разработке такого способа целесообразно основываться на быстродействующих алгоритмах обработки изображений с использованием известного математического аппарата вейвлет-преобразования [9].

СИНТЕЗ МОДЕЛИ СУАВ

Результаты оценки информативности телевизионных изображений, полученных с помощью реальных ТВ СН, показали, что объекты на изображениях обладают контрастом относительно фона. Помимо этого, результаты анализа изображений показывают

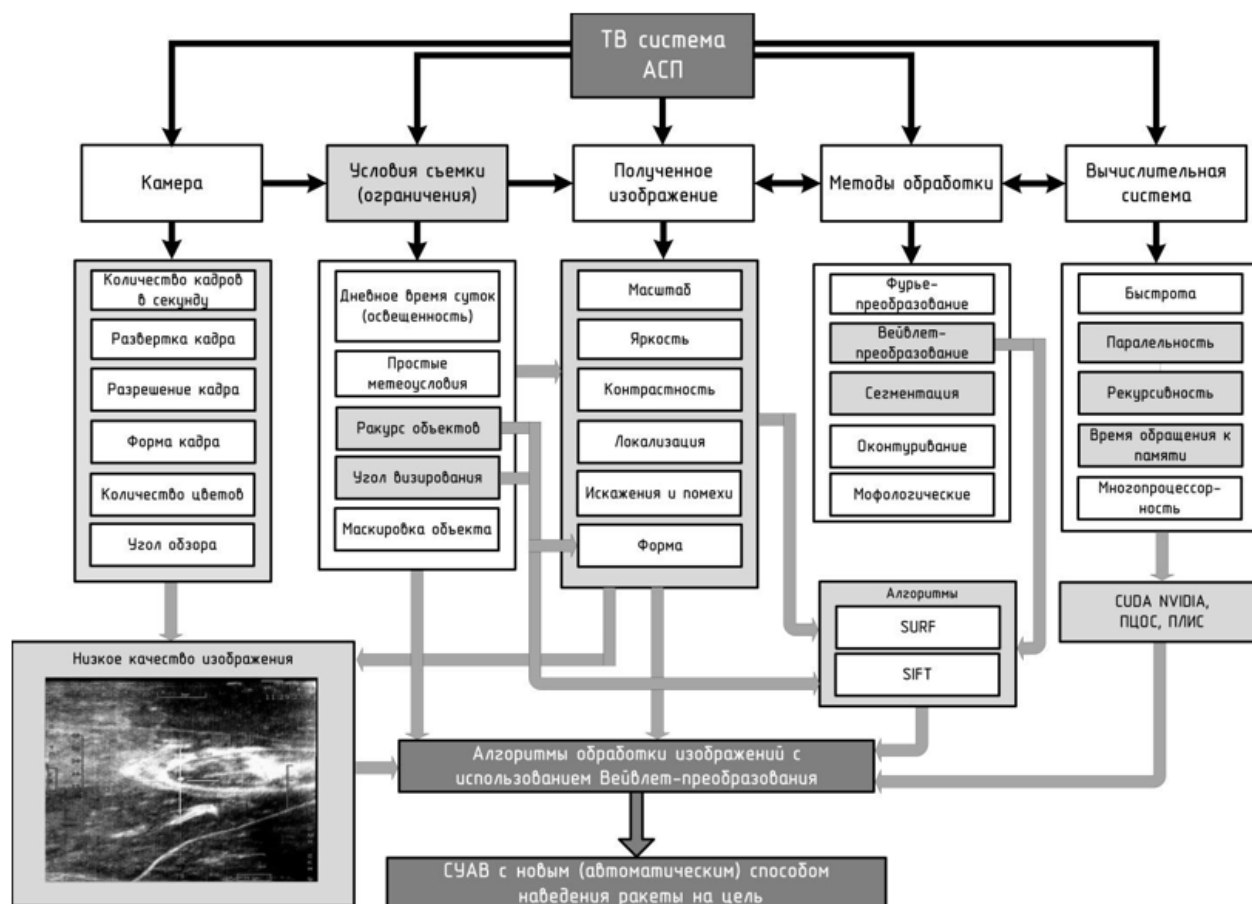


Рис. 6. Результат декомпозиции ТВ СН управляемых АСП

возможность использования контраста при выборе стабильного признака цели, инвариантного к условиям боевого применения – ракурсу объекта, углу визирования и дальности до цели.

Задача автоматизации процесса наведения ракеты с ТВ СН сводится к синтезу рациональной модели СУАВ, обеспечивающей максимум показателя эффективности системы, в качестве которого принята вероятность поражения наземной цели [5]. Для этого необходимо разработать такой алгоритм автоматического обнаружения и распознавания наземной цели, при котором эталонное изображение цели будет найдено на фактическом изображении по вектору признаков с учетом параметров трансляции.

На сегодняшний день одним из самых быстрых алгоритмов сопоставления изображений является известный алгоритм вычисления особых точек изображения SURF, основанный на вейвлет-преобразовании [9]. Принцип его работы заключается в многоу-

ровневом разложении изображения, вычислении веса каждой особой точки с последующей коррекцией весов и отсеянием менее важных порогом. В случае использования простейшего вейвлет-базиса Хаара обеспечиваются: компактность носителя, ортогональность, симметричность и простота вычисления [9]. Особенностью известного алгоритма является то, что при поиске особых точек алгоритм сразу отсекает и не производит прослеживания точек, чьи веса уже на первом уровне меньше порогового. Таким способом обеспечивается равномерное покрытие особыми точками всего изображения – так производится эффективное сравнение двух изображений.

В данной работе для выделения объектов на изображении разработан алгоритм сегментации с вычислением особых точек и отсеянием незначимых точек только на последней стадии после взвешивания всех точек изображения на всех анализируемых масштабах. В результате применения такого подхода

особые точки на изображении сосредотачиваются в тех местах, где содержится большое количество границ мелких областей, и в то же время наблюдается отсутствие особых точек в тех местах, где присутствуют однородные крупные области.

Решение задачи автоматического наведения ракеты класса «воздух-поверхность» на стационарную наземную цель связано с сопоставлением текущего и эталонного изображений с последующим выделением и определением координат заданного объекта с целью формирования сигналов управления. Один из наиболее часто применяемых подходов к выделению объектов на ТВ изображениях основан на сравнении характерных черт, к которым относятся атрибуты точек, линий и областей. В качестве характерных черт могут быть использованы особые точки, получаемые с помощью соответствующих дескрипторов. Вычисление особых точек производится с помощью разработанного алгоритма сегментации на основе SURF. Каждая особая точка характеризуется при помощи дескриптора, сформированного из значений основных коэффициентов вейвлет-преобразования, полученных при помощи алгоритма Малла на заданном уровне вейвлет-разложения изображения. После того, как получены все дескрипторы, осуществляется сравнение дескрипторов эталонного и входного изображений. Для этого в работе использован простейший по вычислительной сложности алгоритм сравнения изображений на основе вычисления евклидова расстояния между дескрипторами.

Результаты работы модифицированного алгоритма SURF, адаптированного для использования в ТВ СН, представлены на рис. 7.

В качестве цели на рисунке 7,а используется нанесенная на подстилающую поверхность

мишень с допустимым радиусом попадания управляемого АСП. На рис. 7,б представлен результат пороговой обработки, на основе которой произведена сегментация (рис. 7,в) и обнаружение цели (рис. 7,г).

Важнейшим свойством алгоритма сопоставления особенностей является способность дескриптора быть инвариантным к повороту. В результате исследования проанализирована зависимость значения евклидова расстояния между эталонным и входным изображением при правильном опознавании (распознавании) от угла поворота входного изображения и установлен доверительный интервал значения расстояния, на котором возможно правильное опознавание: $S_{\min} = 12,59 \pm 1,32$. Также установлено, что доверительный интервал такого значения угла составляет $13,47 \pm 10,79$. С целью выявления количества найденных сопоставлений особых точек, обеспечивающих правильное распознавание, была выявлена зависимость значения количества правильно сопоставленных особых точек при различных углах поворота входного изображения. В результате установлен доверительный интервал значения количества соответствий особых точек для правильного распознавания: $248,08 \pm 14,32$.

В [1] описана модель существующей СУАВ, позволяющая рассчитать эффективность системы с учетом существующих способов наведения АСП и их условий применения. С учетом полученных результатов системного анализа, в работе предлагается представленный на рисунке 8 вариант функционального и структурного синтеза новой модели СУАВ. Существующую модель СУАВ необходимо дополнить новыми блоками, необходимыми для реализации автоматического режима наведения УАСП. Основным отличием от известной модели является учет мгновенного

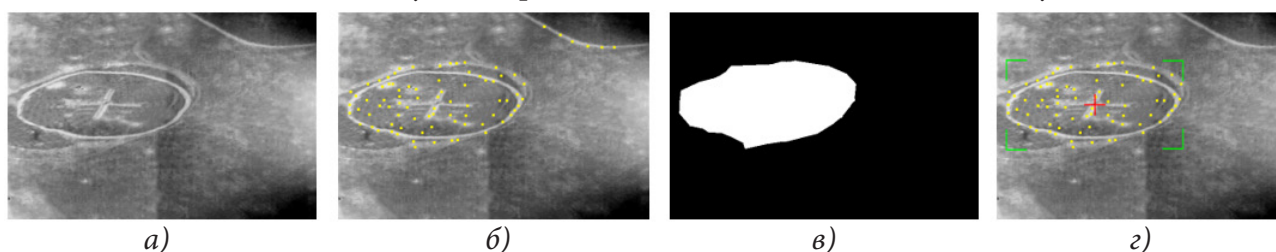


Рис. 7. Результаты работы модифицированного алгоритма

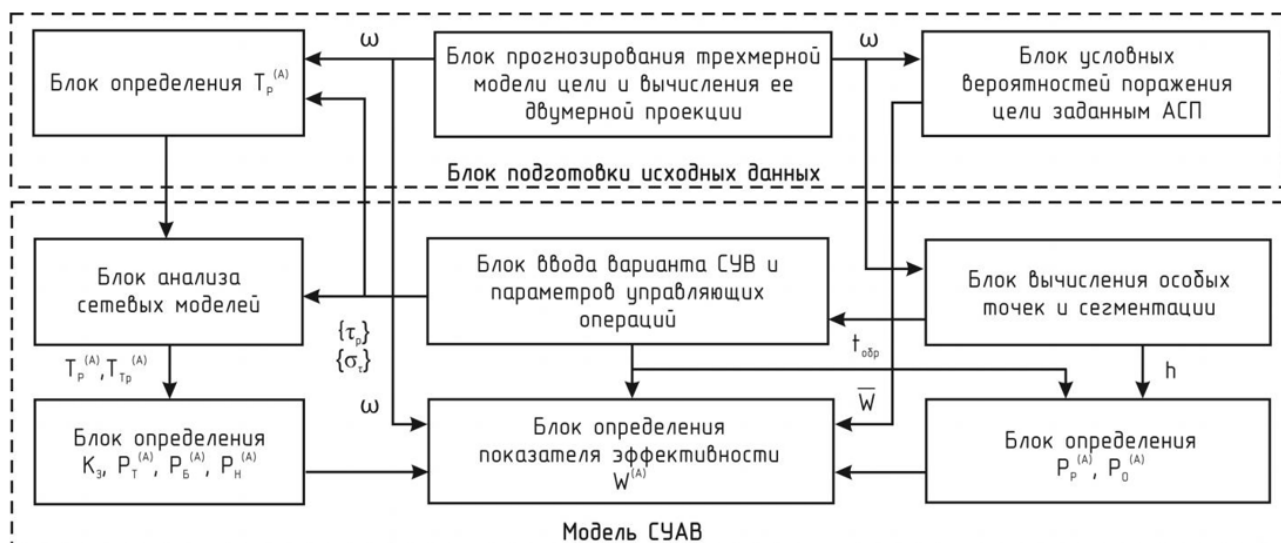


Рис. 8. Функциональная схема синтезированной модели СУАВ

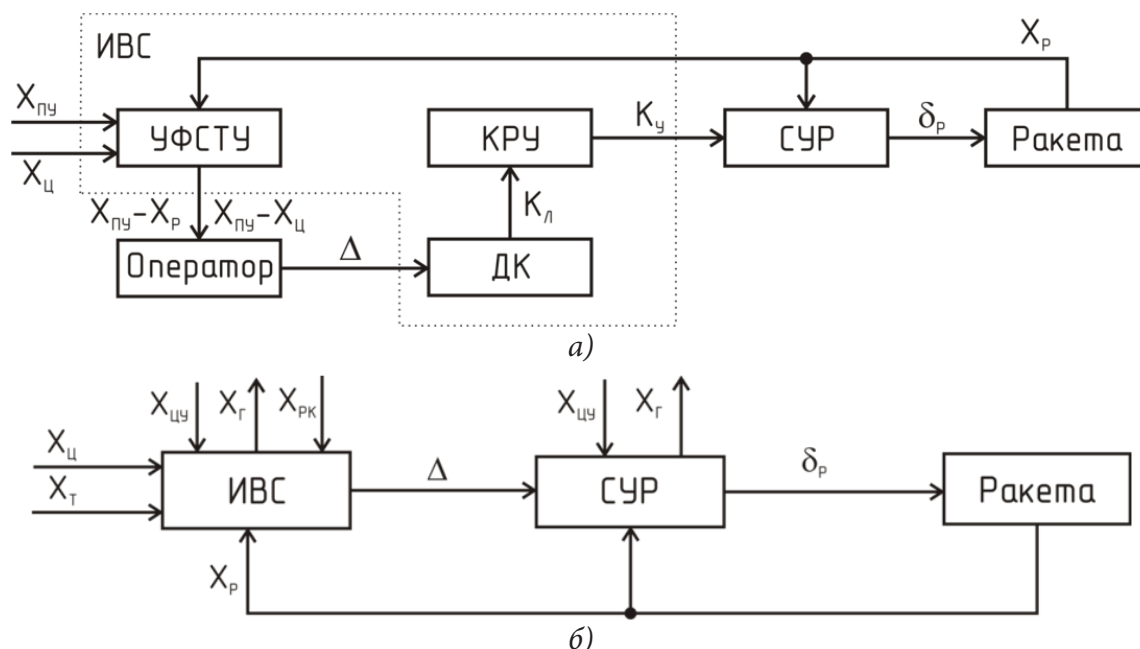


Рис. 9. Модели контура канала радиоуправления: а – с оператором (УФСТУ – устройство формирования сигналов траекторного управления, КРУ – командная радиоперелиния управления, ДК – датчик команд, СУР – система управления ракеты), б – «автоматом» (ИВС – информационно-вычислительная система)

двумерного представления цели с помощью прогнозирования трехмерной модели наземного объекта и вейвлет-преобразование сегментированного изображения с вычислением особых точек объекта.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИ СУАВ

По результатам оценки времени обработки изображений разработанными алгоритма-

ми и последовательности операций построен сетевой график комплекса работ предлагаемой модели СУАВ с автоматическим способом наведения ракеты [10]. Результаты анализа построенного графика показали, что автоматический способ наведения позволяет сократить требуемое время наведения до 11,5 секунд, что на 26 % меньше требуемого времени существующих способов наведения. Однако полученное требуемое время наведения не позволяет обрабатывать видеопоток

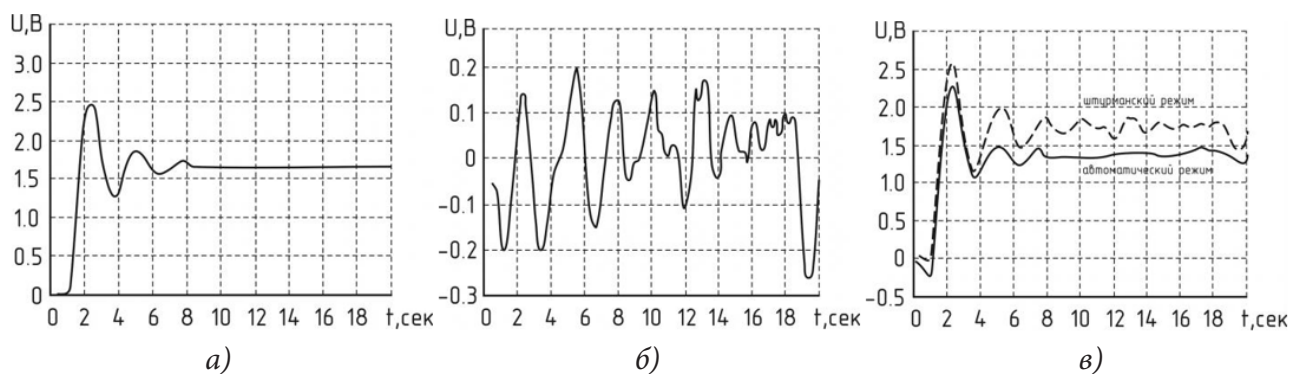


Рис. 10. Оценки промаха ракеты при учете только динамической (а), только флуктуационной (б) и суммарной (в) ошибок

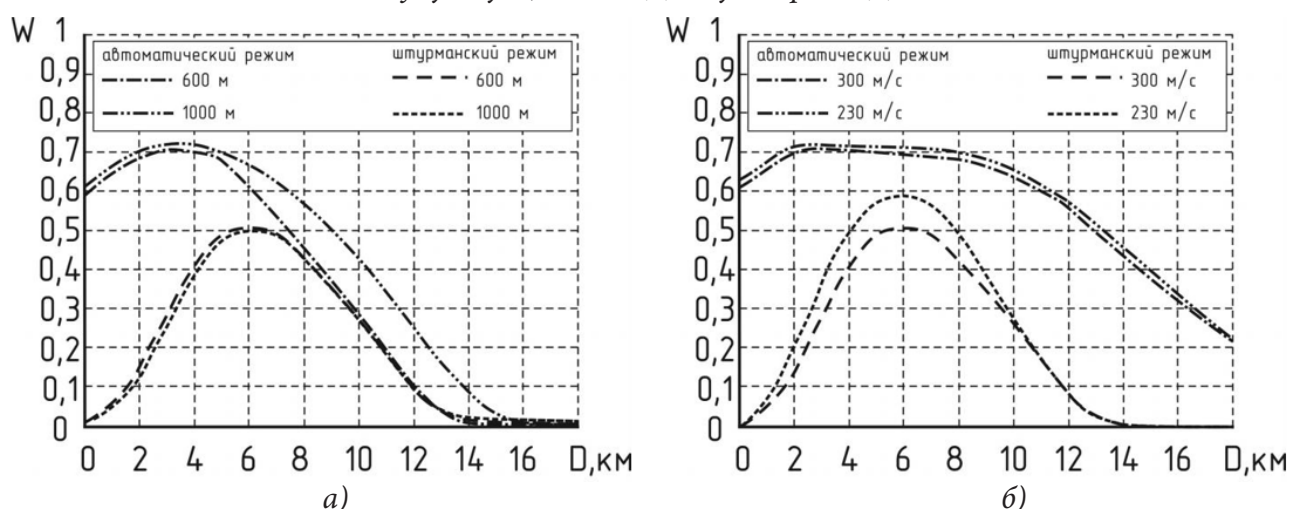


Рис. 11. Эффективность СУАВ при наведении штурманским и автоматическим способами в зависимости от: а – высоты полета, б – скорости полета

в реальном масштабе времени. Дальнейшее сокращение времени до 7 миллисекунд возможно при многопроцессорной обработке, с применением рекуррентных и параллельных алгоритмов и оптимизации обращений к памяти. Это позволит обрабатывать в реальном масштабе времени видеопоток до 142 кадров в секунду.

Для оценки точности наведения управляемого АСП с ТВ СН штурманским и автоматическим способом использовались известные модели контура канала радиопередачи в вертикальной плоскости [11], представленные на рис. 9.

В результате моделирования в среде Matlab Simulink получены оценки суммарной ошибки наведения ракеты при наличии динамической и флуктуационной ошибок, вносимых штурманом и автоматом (рис. 10). Полученные при этом величины промаха составили 7,35 и 2,7 метра соответственно. Из графиков

на рис. 10 видно, что более высокая точность достигается за счет раннего выхода автомата на требуемую траекторию наведения. Таким образом, уменьшение времени наведения за счет разработанного автоматического способа позволяет сократить промах наведения до 61 %.

Результаты оценки эффективности СУАВ (б) с помощью разработанной модели (рис. 8), представлены на рис. 11.

Анализ рассчитанных вероятностей поражения наземного объекта с учетом полученных в работе временных и точностных параметров разработанных алгоритмов показывает, что при типовых условиях боевого применения (начальной высоте 1000 метров и типовой вероятности $\bar{W} = 0,73$) выигрыш в вероятности поражения наземной цели достигает 87 % на малых дальностях до цели (до 6 км), и до 10–15 % на остальных дальностях с момента вывода ракеты в зону поиска цели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен трехэтапный системный анализ существующей в настоящее время СУАВ типового воздушного судна военного назначения, в результате которого обосновано использование УАСП с ТВ СН и выявлена необходимость минимизации влияния пилота при наведении на цель на малых дальностях до цели за счет разработки алгоритмов сегментации, обнаружения и опознавания цели на основе алгоритма SURF. С учетом результатов исследований на каждом этапе и полученных временных и точностных характеристик алгоритмов, синтезирована модель СУАВ с новым, более эффективным автоматическим режимом наведения. Сравнительный анализ графиков зависимости комплексного показателя эффективности СУАВ от дальности до цели при типовых условиях боевого применения УАСП показывает, что пилоту физически не хватает быстродействия в условиях высокой информационной и психологической напряженности. Так, на самом важном этапе наведения на цель, когда дальность до цели составляет менее 6 км и сокращается со скоростью 230–300 м/с, вероятность поражения наземной цели неуклонно падает с 0,5–0,6 до 0,15–0,21.

Как показали приведенные в работе результаты исследований, функциональный и структурный синтез новой модели СУАВ с автоматическим режимом наведения на цель позволяет на конечном этапе наведения до 87 % повысить вероятность поражения наземной цели за счет сокращения времени наведения, поскольку автомат выходит на заданную траекторию не менее чем на 26,8 % быстрее. При этом ошибка определения координат целей не превышает 15 % от их линейных размеров, что, возможно, позволит поражать цели в наиболее уязвимую точку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каракулько А. Н. Системы управления авиационным вооружением / А. Н. Каракулько. – Ставрополь: ВАТУ, 2000. – 231 с.
2. Фадин А. Г. Моделирование радиоэлектронных систем на ЭВМ / А. Г. Фадин. – Воронеж: ВПРЭ, 2000. – 493 с.
3. Антонов А. В. Системный анализ : учебник для вузов / А. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 2004. – 454 с.
4. Визильтер Ю. В. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов // Техническое зрение в системах управления мобильными объектами: труды научно-технической конференции-семинара. Вып. 4 / Под ред. Р. Р. Назирова. – М. : КДУ, 2011. – С. 44.
5. Мильграмм Ю. Г. Боевая эффективность авиационной техники и исследование операций / Ю. Г. Мильграмм, И. С. Попов. – М. : ВВИА, 1970. – 500 с.
6. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Авиационное вооружение и авионика. – Т. 10. – М. : Оружие и технологии, 2005. – 784 с.
7. Краснов А. М. Оптико-электронные системы авиационного вооружения : учебник для слушателей и курсантов ВВУЗов ВВС / А. М. Краснов, Г. А. Донгаев, И. И. Маслов, Е. М. Пермяков, В. Г. Рычков, В. А. Конуркин. – М. : ВВИА, 2007. – 1272 с.
8. Алпатов Б. А. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б. А. Алпатов, П. В. Бабаян, О. Е. Балашов, А. И. Степашкин. – М. : Радиотехника, 2008. – 176 с.
9. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
10. Табырца Д. В. Анализ деятельности экипажа фронтовой авиации при применении ее по наземным целям / Д. В. Табырца, С. А. Попов // Актуальные проблемы вузов ВВС: межвузовский сборник. – М. : МО РФ, 2009. – С. 312–316.
11. Канащенков А. И. Авиационные системы радиоперехвата. Т. 3. Системы командного радиоперехвата. Автономные и комбинированные системы наведения / А. И. Канащенков, В. И. Меркулов. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с.

Кузнецов В. А. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования, факультет авиационного радиоэлектронного оборудования, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).
E-mail: foxhound82@mail.ru

Табырца Д. В. – преподаватель кафедры эксплуатации бортового авиационного радиоэлектронного оборудования, факультет авиационного радиоэлектронного оборудования, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).
E-mail: foxhound@mail.ru

Kuznetsov V. A. – Candidate of Technical Sciences, Senior Teacher, Department of Operation of Airborne Radio Electronic Equipment, Aviation Radio Electronic Equipment Faculty, Air force academy.
E-mail: foxhound82@mail.ru

Tabyrtsa D. V. – Teacher, Department of Operation of Airborne Radio Electronic Equipment, Aviation Radio Electronic Equipment Faculty, Air force academy.
E-mail: foxhound@mail.ru