Обработка видеоинформации в адаптивной системе контроля сближения космических аппаратов

Video processing in adaptive control system of spacecraft rendezvous

Бобровский / Bobrovskiy A.
Алексей Иванович
(albob@mail.ru)
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник.
ФГУП «Государственный
научно-исследовательский институт прикладных
проблем», начальник научно-исследовательского
центра.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: адаптация – adaptation; управление – control; обработка информации – data processing.

Рассмотрены основные методы обработки видеоинформации в системе контроля сближения космических аппаратов. Показано, что, в развитие итерационного принципа контроля сближения С. П. Королёва, к этапам сближения космических аппаратов должны адаптироваться параметры разложения изображения, обработки информации в контуре управления видеоинформационной системой и в кодере источника.

Basic methods of video processing in adaptive control system of spacecraft rendezvous have been reviewed. It has been shown that following S.P. Korolev`s anti-collision principle, the parameters of image decomposition, data processing in video information system control circuit and in the source coder shall be adapted to the stages of spacecraft rendezvous.

Идея адаптации системы контроля сближения космических аппаратов (КА) с использованием видеоинформационных измерительных систем, является развитием принципа итерационного контроля сближения КА, выдвинутого С. П. Королёвым в работе «Предложения по созданию средств для орбитальной сборки» [1]. Итерационный принцип сразу привёл к применению двух телекамер – с широким и узким углом поля зрения [2], после перехода к твердотельным матричным фотоприемникам была выдвинута идея изменения кадровой частоты и числа пикселов (чёткости) изображения [3, 4]. Основным результатом разработки методов адаптации видеоинформационной системы контроля сближения КА стало правило выравнивания дисперсий приращений сигнала изображения по полю $D_{\Delta x}$ и по времени $D_{\Delta t}$. Затем была выявлена необходимость перехода от традиционных систем управления по разности наблюдаемого сигнала и опорной величины (напр., [5, 6]) к решающей статистике отношения измеренных дисперсий межэлементных и межкадровых приращений $D_{\Delta t}/D_{\Delta x}$ [7, 8].

Современный этап моделирования, структурного и статистического параметрического синтеза обработки видеоинформации в системе контроля сближения КА (рис. 1) [9, 10] характеризуется формализацией критериев качества работы и адаптации параметров этой проблемно-ориентированной системы управления и принятия решения в целом и её подсистем – обнаружения оптического сигнала от кооперируемого КА на дальней дистанции, управления параметрами разложения изображения в фотоприёмной матрице, и кодирования источника (сжатия информации). Не затрагивая вопросов формирования оптимального управления кинематикой сближения КА [11] и возможных уточнений моментов переключения параметров системы на основе априорной информации о конструктивных свойствах кооперируемого КА [12], рассмотрим основную специфику системы обработки информации и управления режимами работы фотоприемной матрицы.

На всех этапах обработки видеоинформации адаптация обусловлена существенными изменениями статистик сигнала по мере изменения дальности до КА: видимой яркости, размеров и скорости объекта, а также ограничениями:

– фотоприёмник имеет не только конечное число $N_{\text{пикс.}}$ пикс., но и конечную скорость считывания информации $F_{\text{сч}}$, т. е. максимальную кадровую частоту $F_{\text{к}}$ при этом числе пикселов: $F_{\text{к}} \times N_{\text{макс}} \leq F_{\text{сч}}$.

Адаптация параметров разложения для разных дистанций имеет свои важные особенности. На больших дальностях после обнаружения КА [13] и оценки его пространственных координат осуществляется переход (рис. 2):

· от широкоугольной телекамеры к соосной узкоугольной телекамере [2];

· от наблюдения при большом времени накопления (низкой кадровой частоте, необходимой для повышения дальности обнаружения) к кадровой частоте $F_{к0}$, предельно возможной при полной чёткости $N_{макс}$ пикселов применённой фотоприёмной матрицы [9, 10];

· от наблюдения с полной чёткостью к сокращённой чёткости с повышением кадровой частоты для уменьшения динамического промаха [7–10].

В силу дискретности растра изменение чёткости изображения может осуществляться группированием сигналов пикселов только дискретно, что в совокупности с флуктуациями решающей статистики из-за шумов видеосигнала вносит важную специфику в синтез системы управления.

Адаптация параметров на этапе сопровождения объекта при дискретном обмене чёткости и кадровой частоты в матричных фотоприемниках имеет аналогию в последовательном анализе по Вальду [14]. В синтезированной системе управления так же, как в [14], формируется два порога (верхний и нижний), причём, если решающая статистика больше верхнего порога, то в последовательном анализе принимается первая гипотеза (например, о наличии сигнала объекта). Аналогично в синтезированной системе управления при значениях решающей статистики выше верхнего порога устанавливается (сохраняется) высокая чёткость; если решающая статистика ниже нижнего порога, в последовательном анализе принимается альтернативная гипотеза, в рассматриваемой системе управления устанавливается (сохраняется) высокая кадровая частота. Если значение решающей статистики находится между порогами – обе концепции предлагают продолжать наблюдение.

В некотором смысле обработка информации в синтезированной системе при критерии максимума времени

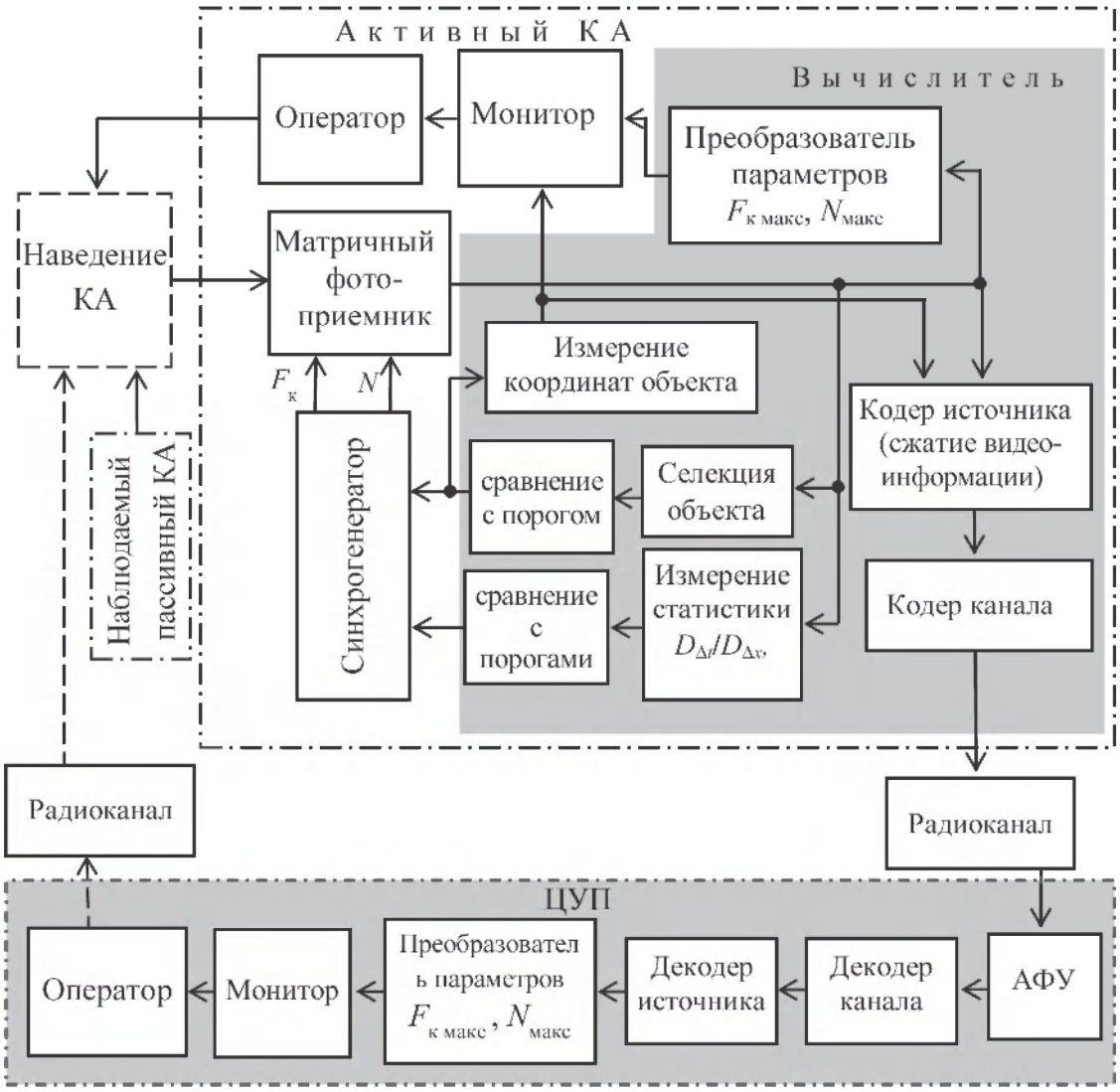

Рис. 1. Структура видеоинформационной системы контроля сближения КА

нахождения системы в состоянии решающей статистики между порогами [10] аналогична решению задачи о разладке [15], в которой находится минимум времени принятия решения при заданной вероятности ложной тревоги: при обработке информации в обеих системах оптимум ищется вариацией порога принятия решения и постоянной времени рекурсивного фильтра формирования решающей статистики.

В общем случае система может иметь множество состояний с различным числом эффективных пикселов (полученных группированием исходных пикселов по 2×2, 3×3, 4×4 и т. д.) с соответствующим увеличением кадровой частоты. Динамика изменения параметров разложения, качественно намеченная на рис. 2, иллюстрируется фазовым портретом системы (рис. 3), показывающим изменение состояния системы по мере сближения КА.

В общем случае дискретных состояний системы может быть много, но ниже рассмотрим наглядный вариант системы с двумя состояниями 2, 3, 5. Экспериментальная проверка обмена пространственной чёткости и кадровой частоты [13] (рис. 4) показала реализуемость и эффективность разработанной концепции. При моделировании смена режимов производится со следующими параметрами (отрабатываются варианты для реальной системы с существенно большим исходным форматом):

· Режим 1 (исходный): размер изображения 840×540, частота кадров 5 Гц;

· Режим 2: размер изображения 420×270, частота кадров 10 Гц;

· Режим 3: размер изображения 210×135, частота кадров 20 Гц.

В процессе контроля сближения и стыковки наблюдаемое положение КА претерпевает два вида изменений: в силу наличия скорости сближений и в силу импульсной коррекции траектории активного КА. Поэтому фильтрация решающей статистики по критерию минимума средквадратической ошибки, как для нестационарного процесса, включает как элементы линейной фильтрации, так и нелинейной фильтрации – обнаружения маневра кооперируемого КА [16].

При отображении видео на мониторе (в схеме рис. 1 как на борту, так и в ЦУП – после декодирования), каждый кадр выстраивается в видеокарте в виде отдельной картинки, а далее выводится на монитор, имеющий частоту полной смены изображения, к примеру 60 Гц. Если на нем отображается видео с кадровой частотой 5 Гц, то видеокарта посылает на монитор один и тот же кадр сюжета 12 раз, при кадровой частоте 10 Гц – 6 раз, при кадровой частоте 20 Гц – 3 раза. При этом видеокарта, получив изображение любого из применённых форматов, должна растянуть его до размеров монитора аппаратным методом интерполяции, не влияющим на производительность, (билинейная либо бикубическая), т. е. каждый кадр сюжета видеокарта перед выводом изображения на монитор интерполирует его, а потом выводит несколько раз в зависимости от кадровой частоты сюжета.

Важной особенностью бортовой системы обработки видеоинформации на рис. 1 является взаимосвязь её подсистем: обнаружение и оценивание координат объекта

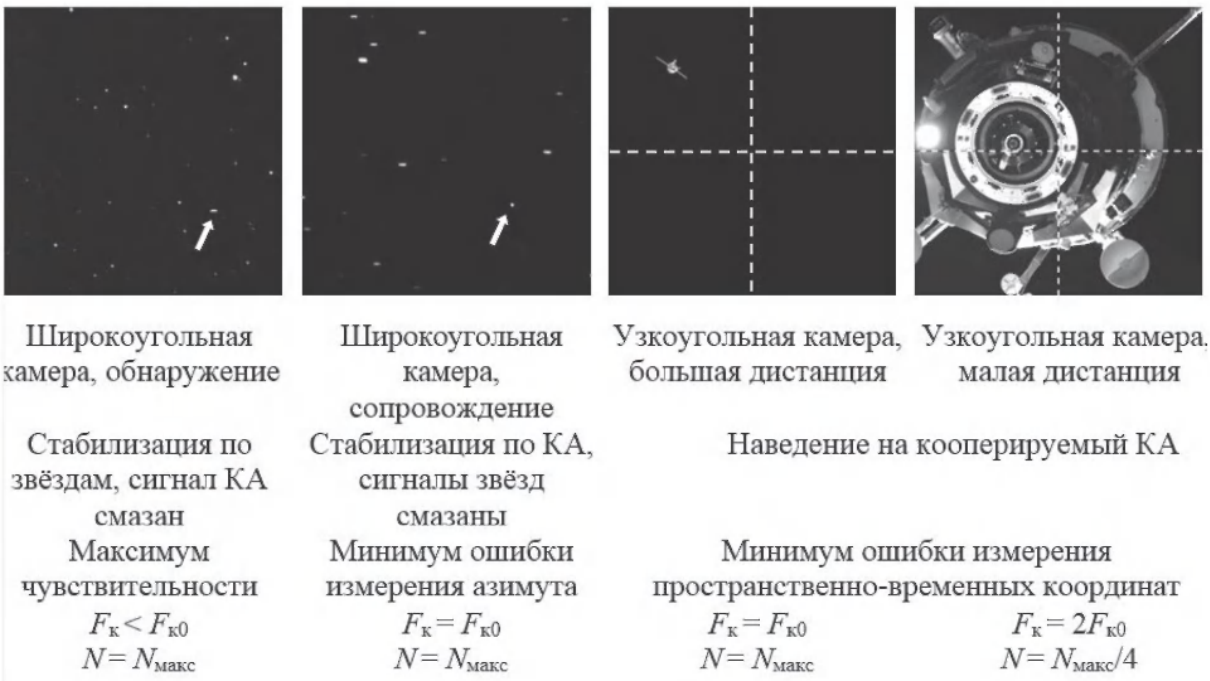

Рис. 2. Этапы адаптации телевизионной системы

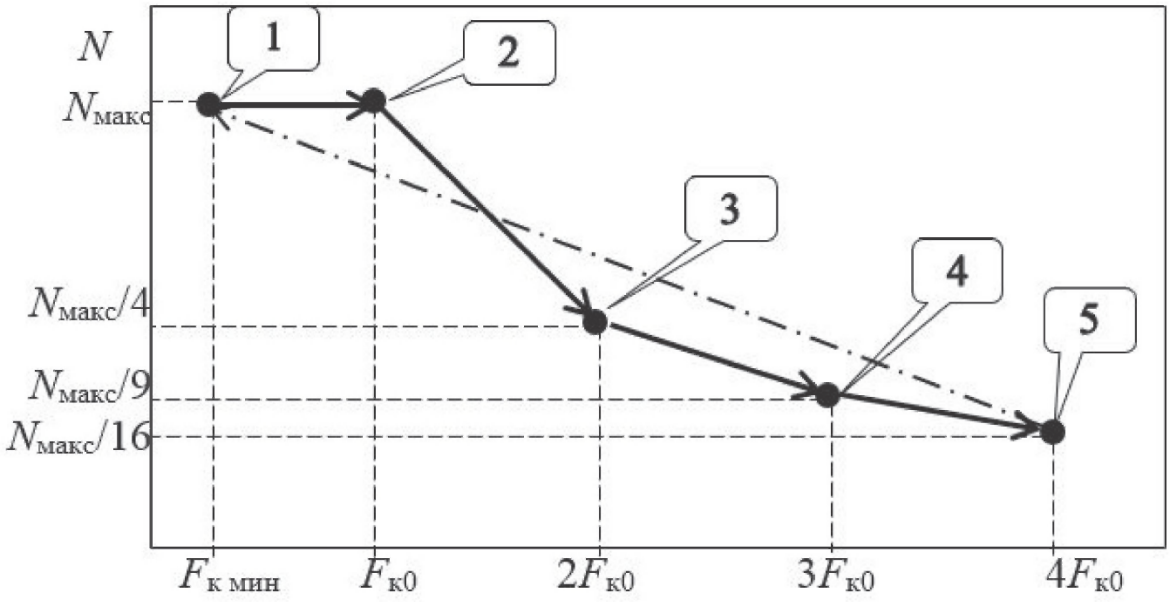

Рис. 3. Состояние 1 – низкая кадровая частота, высокая четкость; состояние 2 – максимальная кадровая частота $F_{к0}$ при полной четкости; состояние 3 – повышенная в 2 раза кадровая частота; состояние 4 – повышенная в 3 раза кадровая частота; состояние 5 – повышенная в 4 раза кадровая частота; пунктир – переходсистемы в исходное состояние по завершении стыковки КА

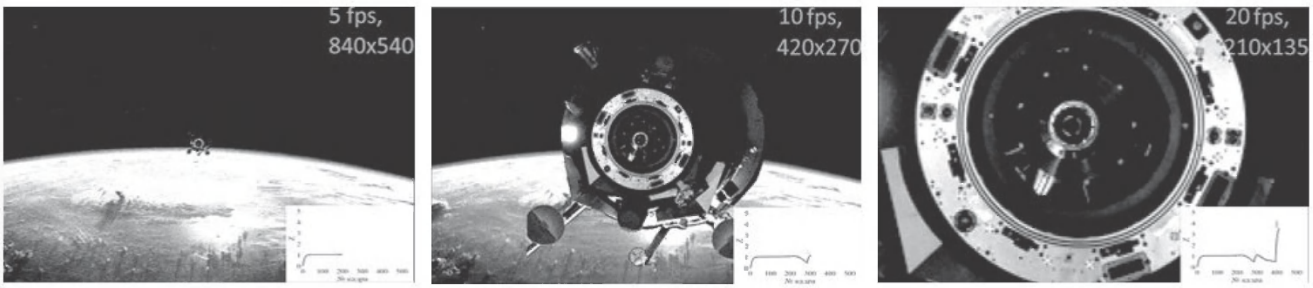

Рис. 4. Выборочные кадры из видеофильма, сформированного с помощью системы с взаимообменом кадровой частотой и числа пикселов, адаптирующимися к изменению решающей статистики отношения межкадровых и межэлементных приращений по мере приближения КА

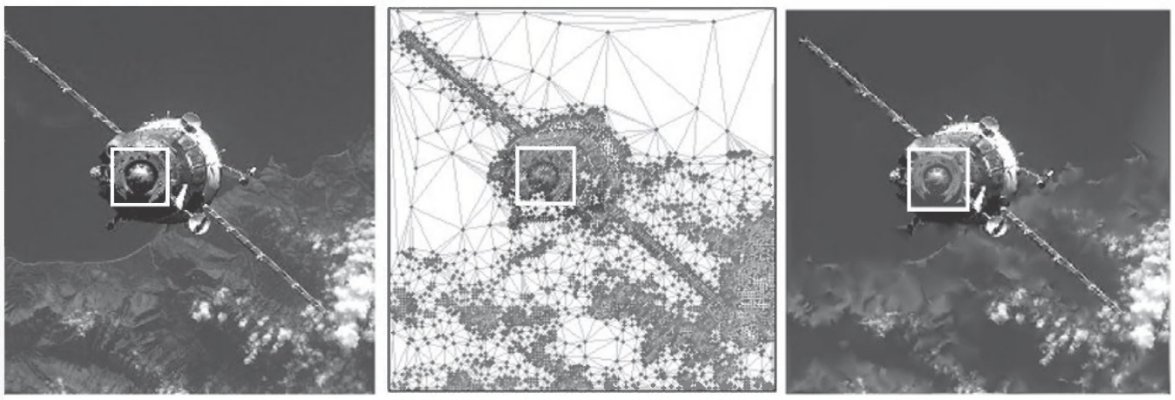

Рис. 5. Пример кодирования и декодирования изображения по опорным точкам с различными порогами для объекта и фона; порог выделения опорных точек в окне интереса $\gamma_о = 13$, вне окна $\gamma_ф = 98$, передаваемая информация в окне $R_о = 4{,}2$ бит/пиксел, вне окна $R_ф = 0{,}8$ бит/пиксел

управляет параметрами и фотоприемной матрицы, и кодера изображения (в силу требования минимальных задержек кодирование должно осуществляться как внутрикадровое, напр. на основе дискретного косинусного преобразования, как в JPEG, или по опорным точкам [17]). Формируемые оценки видимых размеров объекта (в окне интереса) позволяют осуществлять кодирование–декодирование видеоинформации с различными точностями (порогами выделения спектральных компонент или опорных точек) для доминантного фрагмента и фонового изображения (рис. 5).

В результате такого адаптивного кодирования среднеквадратическая ошибка восстановления сигнала в окне и вне его различна (для рис. 5 соответственно 13 и 88), что позволяет достичь сокращения скорости передачи на порядок без снижения точности оценок пространственно-временных координат объекта.

Заключение

Обработка информации в фотоприемной матрице и бортовом цифровом процессоре контура управления видеоинформационной системой и кодирования источника должна адаптироваться к этапам сближения КА. Адаптация телевизионной системы к дистанции до кооперируемого КА позволяет найти решение задачи минимизации ошибок измерения изменяющихся во времени координат объектов при ограничении скорости считывания информации с фотоприёмных матриц. В решение задачи входят условные оптимальные чёткость и кадровая частота при их дискретно переключаемом взаимообмене, осуществляемом на основе тенденции к равенству дисперсий межэлементных и межкадровых приращений. Требование устойчивости системы автоматического управления параметрами разложения измерительной системы обуславливает введение гистерезиса, определяемого дискретностью растра и флуктуациями решающей статистики.

Изложенная концепция является отражением нового направления в теории прикладных видеоинформационных систем: оптимизация системы имеет целью извлечение информации максимального качества, без оглядки на ограниченность зрения человека-наблюдателя, с учётом ограничения пропускной способности каналов связи телекамеры и бортового компьютера и/или ЦУП, отражает важный эффект влияния твердотельной технологии на изменение методов системного анализа и синтеза, оптимизации, управления, принятия решений и обработки видеоинформации.

Литература

1. Творческое наследие академика Сергея Павловича Королёва. Избранные труды и документы / Под ред. М. В. Келдыша – М., Наука, 1980. – 592 с.

2. Брацлавец, П. Ф. Космическое телевидение / П.Ф. Брацлавец, И.А. Росселевич, Л.И. Хромов. – М., Связь, 1967. 2-е изд, 1973. – 248 с.

3. Козлов, В. В. Реализация принципа итерационного сближения в космическом телевидении / В.В. Козлов // Информация и Космос. – 2012. – № 1. – С. 85–88.

4. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов / А.А. Манцветов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники, сер. Техника телевидения. – 2012. – Вып. 1. – С. 29–43.

5. Микрин, Е. А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов / Е.А. Микрин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 245 с.

6. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В.В. Кульба [и др.] ; под ред. Е. А. Микрина. – М.: Наука, 2006. – 579 с.

7. Теория и практика космического телевидения / под ред. А.А. Умбиталиева, А.К. Цыцулина. – СПб: НИИ телевидения, 2017. – 368 с.

8. Статистический синтез управления телевизионной системой, адаптивной к динамике сюжета / А.А. Умбиталиев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2016. – Вып. 1. – С. 3–11.

9. Адаптация параметров разложения телевизионного координатора целей / А.А. Умбиталиев [и др.] // Труды военно-научной конференции «Актуальные научно-технические аспекты разработки, испытаний и эксплуатации средств ракетно-космической обороны». СПб, ВКА им. А. Ф. Можайского, 20 октября 2017 г. – С. 183–188.

10. Бобровский, А. И. Адаптация прикладной телевизионной системы к динамике сюжета / А.И. Бобровский // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – № 3. – С. 3–9.

11. Гончаревский, В. С. Оптимальное управление взаимным манёвром космических аппаратов при использовании методов инерциального параллельного сближения и сближения по радиолучу / В.С. Гончаревский // Информация и Космос. – 2018. – № 1. – С. 150–154.

12. Бачевский, С. В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорций в матричных телевизионных системах / С.В. Бачевский // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2010. – Вып. 1. – С. 57–66.

13. Обнаружение объектов на звёздном фоне / Г.В. Левко [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2016. – Вып. 2. – С. 29–38.

14. Вальд, А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.

15. Ширяев, А. Н. Статистический последовательный анализ / А.Н. Ширяев. – М.: Наука, 1976. – 272 с.

16. Рекурсивная фильтрация опорной статистики адаптивной телевизионной системы/ А.К. Цыцулин [и др.] // Материалы 15-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 26–27 июня 2017 г. – С. 199–203.

17. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений / А.И. Бобровский [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия Техника телевидения. – 2017. – Вып. 3. – С. 29–38.