

УДК: 681.51.033

DOI: 10.53816/20753608_2022_4_11

МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN CONTROL SYSTEMS UNMANNED AERIAL VEHICLES

Чл.-корр. РАРАН С.Н. Шаров, В.А. Смирнов, С.Г. Толмачев

АО «Концерн «Гранит-Электрон»

S.N. Sharov, V.A. Smirnov, S.G. Tolmachev

Рассмотрены основные технические направления работы АО «Концерн «Гранит-Электрон» для модернизации и повышения эффективности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), начиная с систем, информационного обеспечения полётной задачи, выбора параметров сложных зондирующих сигналов, первичной и вторичной обработки эхо-сигналов, опознания наблюдаемых объектов для повышения помехозащищённости бортовой аппаратуры, а также особенностей групповой работы летательных аппаратов. Технологии интеллектуальных систем являются определяющими направлениями создания современных корабельных радиоэлектронных комплексов, аппаратуры и программного обеспечения систем управления БПЛА.

Ключевые слова: методы искусственного интеллекта, обработка информации эхо-сигналов.

Overview of the directions for JSC «Concern «Granit-Electron» of the use of artificial intelligence methods to modernize and improve the efficiency of unmanned aerial vehicles (UAV). Systems, information support for flight missions, selection of parameters of complex sounding signals, primary and secondary processing of echo signals, identification of observed objects to increase interference with the on-board equipment, as well as features of group work of aircraft. Technologies of intelligent systems are the determining directions for the creation of modern shipboard radio-electronic complexes, equipment and software of UAV control systems.

Keywords: artificial intelligence techniques, information processing of echo signals.

АО «Концерн «Гранит-Электрон» — базовое предприятие 5-го научного отделения РАРАН, в 2021 году отметило 100-летний юбилей своего образования. Определением технической направленности предприятия на вооружение Военно-Морского Флота послужили изобретения В.И. Бекаури. Учитывая важность и необходимость реализации этих изобретений в части дистанционного управления торпедами и противокорабельными минами, постановлением Совета Труда и Оборона по Мандату, выданному

В.И. Ульяновым (Лениным) в августе 1921 года, образовано Особое Техническое Бюро по военным изобретениям специального назначения. Так определилась основная сфера всей последующей деятельности предприятия как создание радиоэлектронного вооружения и систем управления оружием для Военно-Морского Флота России [1].

В настоящее время отработанная система проектирования больших комплексов аппаратуры с использованием стендов математического и полунатурного моделирования, наличие



Рис. 1. Электронная продукция АО «Концерн «Гранит-Электрон» в вооружении и военной технике

современных высоких технологий и научных кадров в совокупности позволяют АО «Концерн «Гранит-Электрон» удерживать передовые позиции и на экспортном рынке в области создания сложных электронных комплексов, входящих в систему управления ракетных комплексов морского и наземного базирования (рис. 1).

Информационно-управляющие контуры систем мониторинга для управления оружием и техническими средствами судов и надводных кораблей

В состав корабельных комплексов БПЛА [2] входят многофункциональные радиоэлектронные комплексы (МРЭК) освещения надводной обстановки (ОНО), корабельные автоматизированные системы управления (КАСУ) и бортовые автономные системы управления (БАСУ) (рис. 2).

МРЭК ОНО решают задачи [3–6]:

- помехозащищенного скрытого ОНО активными и пассивными радиолокационными и оптическими средствами;
- обнаружения, автоматического сопровождения, определения координат и параметров движения надводных объектов-целей;
- обнаружения, распознавания и определения координат объектов по излучениям их радиоэлектронных средств;

– выработки и выдачи информации о надводной обстановке в корабельную аппаратуру системы управления и в информационно-управляющую систему (ИУС) носителя противокорабельных ракет (ПКР);

– взаимодействия с внешними источниками информации, которыми могут быть корабли, авиационные и космические средства мониторинга и др.

КАСУ решают задачи:

– приема и обработки информации от системы ОНО, навигационного комплекса (НК), ИУС корабля;

– выработки данных полетного задания (ПЗ) для системы управления ПКР;

– организации одиночного или группового использования ПКР и др.

БАСУ обеспечивает высокую эффективность применения ПКР, управляя ее полетом и выполняя требования ПЗ.

Средства ОНО совместно с корабельной и бортовой информационными системами управления ПКР составляют единый информационно-управляющий комплекс, который, в свою очередь, состоит из трех самостоятельных контуров:

- контура целеуказания (ЦУ), объединяющего априорную и текущую информацию о количестве и координатах целей, их типе, а также дополнительные сведения об обстановке в районе их нахождения;

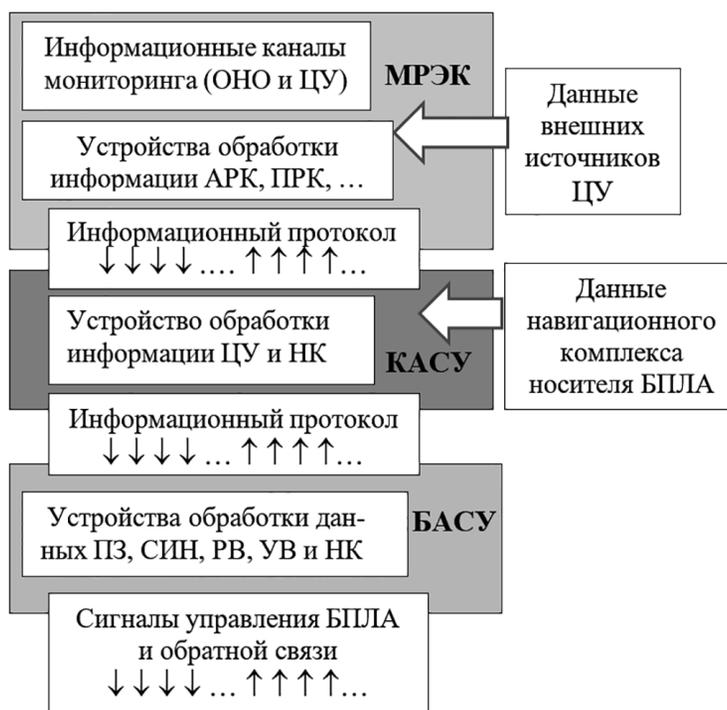


Рис. 2. Структура информационно-управляющей системы БПЛА:

АРК — активный радиолокационный канал; ПРК — пассивный радиопеленгационный канал;
 ПЗ — устройство формирования полётного задания; СИИ — система инерциальной навигации;
 РВ — радиовысотомер; УВ — устройство визирования (мониторинга); НК — навигационный комплекс

– корабельного контура системы управления, в котором по информации о ЦУ, текущем положении корабля-носителя БПЛА и в соответствии с поставленной боевой задачей производится выработка полетного задания при групповом использовании БПЛА;

– бортового контура системы управления ПКР, обеспечивающего высокоточное наведение ракеты в заданную цель.

Поскольку решение перечисленных задач осуществляется в жестких временных рамках в условиях противодействия, обработка информации в этих контурах требует высокопроизводительных интеллектуальных алгоритмов.

Комплексный анализ состояния и перспектив развития систем вооружения кораблей позволил определить основные задачи, решаемые высокоточным оружием (ВТО) следующего поколения, — повышение эффективности ракетного оружия (РО) ВМФ за счет:

– увеличения точности наведения в заданную цель. Обеспечение высокоточного управления конечным положением летательного аппарата, включая реализацию известных и новых

перспективных законов самонаведения, обеспечивающих наведение в контрастные и неконтрастные объекты;

– увеличения помехоустойчивости и скрытности бортовых информационных каналов, обеспечивающих навигационные параметры летательного аппарата, поиск, обнаружение и измерение координат объектов-целей;

– обеспечения аэродинамического управления движением БПЛА, включая рикошетирующие, планирующие и традиционные (низковысотные и баллистические) траектории;

– обеспечения возможности решения широкого круга функциональных задач (обнаружение подвижных и стационарных, морских и наземных, контрастных объектов и ориентиров неконтрастных объектов);

– более широкого использования преимуществ залповой стрельбы для повышения помехозащищенности и точности определения координат заданных объектов-целей;

– обеспечения решения новых задач боевыми БПЛА: формирование полетных заданий для отделяемых грузовых контейнеров, возвращение

к заданному месту приводнения или сухой посадки после выполнения основного задания, выполнение функций разведки и целеуказания, постановка помех в интересах радиоэлектронной борьбы (РЭБ).

Сетецентрическая доктрина НАТО направлена на наблюдение в реальном времени поверхности Земли и Мирового океана с высокой разрешающей способностью, обеспечивая сопровождение движения гражданских судов, военных кораблей и подводных лодок, и определяя расположение артиллерийских орудий и ракетных пусковых установок и дислокацию подразделений сухопутных войск. Аналогичные требования предъявляются к средствам освещения надводной и подводной обстановки ВМФ в зоне театра военных действий.

Отечественные комплексы аппаратуры дистанционного наблюдения за космическими аппаратами (КА), беспилотными и пилотируемыми летательными аппаратами (БПЛА и ЛА), береговыми и корабельными радиолокационными станциями (РЛС) состоят из трех основных частей: измерительная (сенсорная) часть, аппаратура линии связи и программно-аппаратный комплекс (ПАК), с которым на автоматизированных рабочих местах (АРМ) работают операторы, решающие разнообразные задачи [2, 7].

Управление мгновенным полем зрения РЛС для мониторинга заданного района с минимальными энергетическими затратами КА

Коническая развертка поля зрения РЛС мониторинга окружающего пространства или поверхности Земли используется в наземных системах обнаружения летательных и космических аппаратов, а также для поиска наземных объектов с борта летательных аппаратов (ЛА) и космических аппаратов (КА) [2–6].

На рис. 3 приведена схема устройства обнаружения объекта-цели и определения его координат относительно аппарата, в котором используется коническое сканирование за счет вращения аппарата. Для увеличения углового пространства или площади мониторинга поверхности Земли необходимо сканирование мгновенным полем зрения или главным лучом диаграммы направленности.

Сканирование диаграммой направленности возможно при помощи многолучевой антенной системы, где излучатели представляют линейку или сетку рупоров, расположенных в фокальной плоскости рефлектора. Однако число рупоров, размещаемых в фокальной плоскости рефлектор-

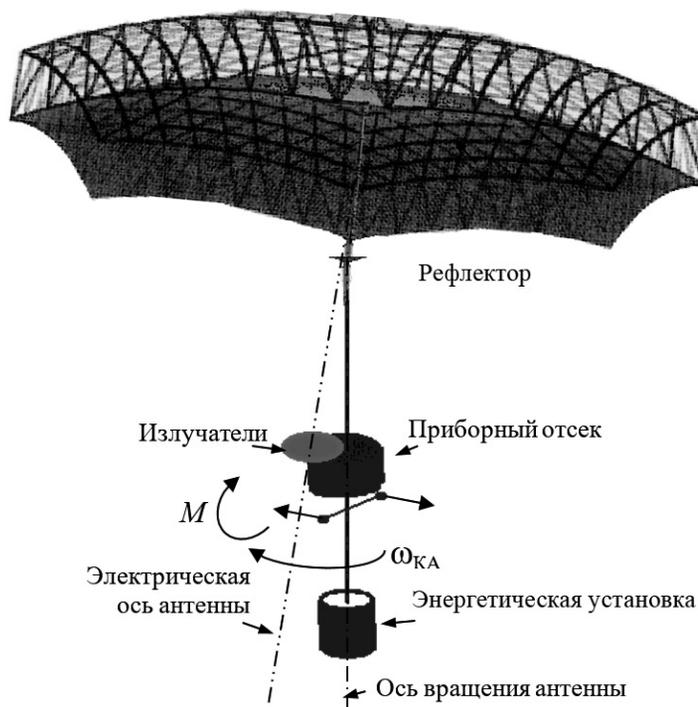


Рис. 3. Схема конструкции РЛС КА

ной антенны или фазированной антенной решетки, ограничено конструкцией КА. Сканирование возможно при помощи вращения всего КА, если антенна РЛС жестко скреплена с его корпусом.

Увеличить площадь осматриваемой поверхности Земли КА, находящимся на геостационарной орбите, возможно, например, перемещением полосы осмотра путем вращения относительно вертикали. Важно отметить, что для равномерного осмотра поверхности требуется переменная скорость вращения электрической оси антенны. Однако создание переменной скорости вращения КА потребует постоянного расхода энергии двигателей КА.

Минимальные энергетические затраты на сканирование обеспечиваются вращением космического аппарата вокруг его продольной оси, так как момент инерции здесь минимальный. Скорость вращения КА определяется его моментом инерции, вращающим моментом двигателей коррекции и временем их работы. Одного импульса двигателей коррекции достаточно, чтобы КА вращался практически неограниченное время. Минимальная скорость (соответственно минимальные энергетические затраты) определяется временем, затрачиваемым локатором на осмотр заданной зоны за один оборот КА. Для осмотра ограниченного сектора, образованного всеми лучами координатора, необходимо вращение КА вокруг оси, направленной в центр заданного углового сектора мониторинга.

Проведенные исследования мониторинга земной поверхности РЛ с предложенным [2] оптимальным алгоритмом переключения парциальных РЛ лучей позволяют обеспечить равномерную засветку с максимальной плотностью зондирующего излучения заданной зоны за минимальное время при постоянной скорости вращения КА вокруг направления на центр зоны мониторинга и постоянной частоте зондирования.

Использование сложных радиолокационных сигналов

В последние три десятилетия в АО «Концерн «Гранит-Электрон» активно развиваются локационные устройства со сложными зондирующими сигналами: с кодо-импульсной модуляцией; с внутриимпульсным кодированием модуляции частоты и фазы внутри каждого кван-

та, а также их различные сочетания [7], которые можно объединить аббревиатурой КЧФМ сигналы. Наиболее широко такие сигналы используются в радиолокационных системах скрытного мониторинга окружающего пространства и поверхности Земли. Такие сигналы обеспечивают максимальную скрытность радиолокационного наведения ракет за счет малой импульсной мощности каждого кванта сигнала на уровне, который на порядок ниже уровня шума. Без знания параметров этого сигнала (не только несущей частоты, но и функции модуляции частоты, фазы и амплитуды) средствам радиоэлектронной разведки невозможно осуществить его оптимальный прием (обнаружить сигнал на фоне естественного шума). Отметим, что эти параметры могут меняться от импульса к импульсу в значительном диапазоне, например по случайному закону.

Реализация таких сигналов различными схемотехническими средствами определяется возможностями существующей элементной базы. Наиболее перспективным способом формирования сложных сигналов является использование высокоскоростных интегральных синтезаторов-модуляторов, функционирующих на принципе прямого цифрового синтеза частоты DDS [7]. Синтез зондирующего сигнала проводится на промежуточной частоте $F_{пр}$ радиолокационной станции, где используется бинарный (1, -1) многозарядный код разбиения длительности сигнала T_c на N_k квантов длительностью $t_{кв}$. Бинарный код полагает два способа модуляции сигнала внутри кванта, например, изменение частоты или фазы сигнала.

Исследование когерентного и некогерентного накопления рассматриваемых сложных сигналов в режиме обзора и сопровождения цели проводится с использованием программ математического моделирования [7]. Используемая модель накопления пачки сложных сигналов позволяет получить численные оценки зависимости отношения сигнал/шум на выходе фазового детектера (ФД) от: заданного отношения сигнал/шум на входе ФД (на выходе усилителя промежуточной частоты (УПЧ)); числа отраженных сигналов от цели; числа эхо-сигналов в пачке; скорости сканирования антенны и параметров ее диаграммы направленности; временного интервала опроса

фазового детектора и дискретности временного квантования сигнала Δt . Указанные оценки проводятся не только в режиме поиска, но и в режиме сопровождения цели при малых угловых отклонениях линии визирования от электрической оси антенны или при известных колебаниях линии визирования в пределах диаграммы направленности антенны (ДНА).

Показано, что когерентное накопление пачки имеет преимущества перед некогерентным накоплением по возможностям анализа спектра пачки эхо-сигналов. Важным преимуществом спектрального анализа когерентной пачки является возможность выявления ΔF_{dp} — отличия промежуточной частоты эхо-сигналов от расчетного значения, компенсирующего доплеровский эффект сближения ЛА с целью. Обнаружение и измерение величины ΔF_{dp} может служить признаком, например, движения морской цели или наличия ошибки сопровождения цели по угловым координатам [7].

Проведенная оптимизация кодовых последовательностей КЧФМ-сигналов позволила создать базу данных для использования КЧФМ сигналов, обеспечивающих обнаружения эхо-сигналов, амплитуда которых в десятки раз меньше среднего уровня шумов приемника в усилителе промежуточной частоты, а также обеспечить измерение спектра наблюдаемых сигналов — важного признака селекции помех и классификации объектов-целей.

Контроль состояния корабельной и бортовой аппаратуры комплексов радиоэлектронного вооружения носителя БПЛА

Внедрению методов ИИ в Концерне «Гранит-Электрон» обязаны системам контроля состояния радиоэлектронного и ракетного вооружения ВМФ на всех этапах изготовления и эксплуатации. Системы контроля аппаратуры на заводе изготовителе, на технической позиции и непосредственно на корабле в пусковой установке — необходимые и важнейшие части комплексов корабельных и бортовых информационно-управляющих систем. Для каждого прибора и электронного блока вводятся датчики, обеспечивающие режим встроенного контроля. Именно здесь возникла острая необходимость в экспертных системах. У настройщиков-сборщиков аппара-

туры и инженеров-контролеров, аттестующих технические параметры аппаратуры, накопился значительный опыт по различным отказам и выявляемым неисправностям. На основании статистики естественно рождались инструкции по поиску отказов или отклонений параметров прибора от допустимых значений, которые были полезны при эксплуатации аппаратуры. Энтузиастом введения средств встроенного контроля на предприятии был начальник лаборатории к.т.н. В.Д. Ланда. Создание базы данных и разработку алгоритмов и программы работы экспертной системы в 70–80-х годах прошлого столетия возглавлял начальник лаборатории к.т.н. Л.Ю. Григорьев.

В настоящее время направление интеллектуализации систем контроля сложных электронных комплексов на предприятии возглавил ведущий научный сотрудник к.т.н. В.А. Смирнов. Он предложил рассматривать систему контроля электропитания сложных корабельных радиоэлектронных комплексов не как разомкнутую систему конечного автомата, принимающего решение о состоянии аппаратуры (годен — не годен), а как иммунную систему человека, которая следит в реальном времени за изменением всех доступных измерению параметров и может прогнозировать предотказное состояние и привлекать имеющиеся аппаратные и программные резервы [8–11].

Вывод. Рассмотрев примеры построения систем управления БПЛА и комплексов радиоэлектронного вооружения АО «Концерн «Гранит-Электрон», необходимо признать, что они соответствуют определению и классификации ГОСТ 59277 как системы с искусственным интеллектом (рис. 4).

Заключение

В настоящее время технологии интеллектуальных систем являются определяющим направлением в задаче создания современных корабельных радиоэлектронных комплексов, аппаратуры и программного обеспечения систем управления БПЛА.

Характерными признаками интеллектуальной системы управления БПЛА являются наличие целевой установки, возможность управления информационными ресурсами (системы МРЭК,



Рис. 4. Схема классификации систем, обладающих искусственным интеллектом

априорными знаниями и текущей ФЦО) для построения стратегии достижения цели, контроля результатов своих действий для достижения максимальной эффективности.

Необходимость использования методов ИИ в системах управления диктуется прогрессом в области средств противодействия информационным системам, а также неопределенностью, многозначностью возникающих ситуаций, их слабой формализацией и зависимостью от многих параметров, многовариантностью принимаемых решений в сложных динамических ситуациях в реальном масштабе времени [17–19].

Предпосылкой для внедрения современных методов ИИ служит технический прогресс в области вычислительной техники, микроэлектроники и эффективных алгоритмов обработки сигналов [12–16].

Использование методов ИИ повышает не только эффективность решения частных задач аппаратуры на отдельных этапах функциониро-

вания МРЭК, КАСУ, БАСУ и КПА, но и эффективность сопровождения комплексов приборов на всех этапах жизненного цикла.

Литература

1. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Мас-тин С.П., Пушин В.Г., Данчул О.К., Земскова Г.И., Лобанов М.А. 100 лет АО «Концерн «Гранит-Электрон». Истоки, история, современность. — СПб.: АО «Концерн «Гранит-Электрон», 2021. 232 с.
2. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Шаров С.Н. Обеспечение мониторинга Земной поверхности космическим аппаратом на геосинхронной орбите // Труды XIX ВНИК РАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности». 2006. Том 4. С. 141–148.
3. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Бредун И.Л. Пути повышения эффективности перспективных бортовых РЛС ПКР в условиях сложного радиоэлектронного противодействия (изда-

ние 2-е, доп. и перераб.). — СПб.: АО «Концерн «Гранит-Электрон». 2016. Том 1. 266 с.; Том 4. 186 с.

4. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Мальцев О.Г. Распознавание типа морской групповой цели по информации корабельных средств пассивной локации // Морской вестник. Спец. выпуск. 2016. № 1(12). С. 7–10.

5. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Мальцев О.Г. Эффективность радиолокационных комплексов освещения надводной обстановки кораблей группы с радиоканалами взаимного обмена информацией // Известия РАН. 2017. № 4 (92). С. 21–26.

6. Коржавин Г.А., Подоплекин Ю.Ф., Шаров С.Н. Направления развития корабельных комплексов освещения надводной обстановки и управления оружием // Труды десятой общероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства специального назначения», СПб. 15–16 ноября 2017 года. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2018. С. 120–123.

7. Соловьева В.В., Толмачев С.Г. и др. Интеллектуальные информационные управляющие системы со сложными локационными сигналами для беспилотных летательных аппаратов. Научное издание. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», АО «Концерн «Гранит-Электрон»; РАН, 2020. 244 с.

8. Смирнов В.А., Смирнов Д.В. Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений для приемочного контроля бортовой аппаратуры // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 18. № 1. С. 149–159.

9. Смирнов В.А., Смирнов Д.В. Разработка концептуальной модели искусственной иммунной системы прогнозирования дрейфа параметров бортовой аппаратуры // Искусственный интеллект и принятие решений. — М.: ИСА РАН, 2017. № 4. С. 95–108.

10. Смирнов В.А., Смирнов Д.В. Подход к прогнозированию дрейфа критических параметров бортовой системы управления на основе модифицированного иммунного алгоритма // N&ES Research — Научные технологии в

космических исследованиях Земли. 2018. № 1. С. 69–81.

11. Смирнов В.А. Нечеткая оценка организационной эффективности информационной системы для технологического контроля // Сб. трудов VI НПК РАН 17.06.2021г. Приложение к сб. «Корабельные и бортовые многоканальные ИУС», вып. № 36, инв. ЛБ-21753). АО «Концерн «Гранит-Электрон». С. 69–79.

12. Соловьева В.В., Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Система поддержки принятия решения при посадке БПЛА на движущееся судно // Морской вестник. 2014. № 4 (52). С. 53–56.

13. Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Семантическое сжатие информации мониторинга группой БПЛА // Искусственный интеллект и принятие решений. — М.: ИСА РАН. 2015. № 3. С. 34–44.

14. Толмачев С.Г., Шаров С.Н. Особенности обработки информации сенсорных датчиков группы БПЛА // N&ES Research — Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2016. Том VIII. № 1. С. 32–38.

15. Толмачев С.Г. Системы искусственного интеллекта. Нейросетевые модели. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2012. 87 с.

16. Толмачев С.Г. Основы искусственного интеллекта. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 2017. 132 с.

17. Каширина Е.И., Каширина О.Ю., Кулаков В.В., Шаманов В.А. Россия в мировых войнах и военных конфликтах. — М.: Прометей, 2020. 363 с.

18. Шаров С.Н. Информационные каналы систем управления: учебное пособие. — СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ». 148 с.

19. Шаров С.Н., Филатов И.В. История создания многоканальных головок самонаведения противокорабельных крылатых ракет в АО «Концерн «Гранит-Электрон» // Сб. докладов VI НПК НО № 5 РАН «Система вооружения для решения задач борьбы на океанских и морских ТВД» «Радиоэлектронное и ракетное вооружение ВМФ: взгляд в будущее» 17 июня 2021 года. БГТУ «ВОЕНМЕХ», сб. АО «Концерн «Гранит-Электрон», вып. № 36, Т. 1, инв. № ЛБ-21753. 2021. С. 44–80.