

На правах рукописи

Емельянова Юлия Геннадиевна

**Алгоритмическое и программное обеспечение
человеко-машинных интерфейсов
с когнитивно-графическим отображением информации
для систем космического назначения**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук (ИПС им. А.К. Айламазяна РАН).

Научный руководитель: Хачумов Вячеслав Михайлович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Еремеев Александр Павлович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ»», заведующий кафедрой

Саяев Владимир Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский
испытательный центр подготовки космонавтов
имени Ю.А. Гагарина»,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова Российской академии наук

Защита состоится «25» марта 2020 г. в 15 час. 00 мин. на заседании
объединенного диссертационного совета Д 999.216.02 при МАИ и МГТУ им.
Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал
Ученого совета ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу 105005, Москва, ул. 2-я
Бауманская, д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета
Д 999.216.02.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
д.т.н., доцент

А.Н. Алфимцев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Одной из важных задач обработки телеметрической информации (ТМИ), поступающей от систем космического назначения, является оперативная оценка контролируемых ситуаций для поддержки принятия решений человека-оператора.

Перспективным направлением исследований служит когнитивная визуализация больших объемов многомерных данных специальными средствами интерфейса наземных станций командно-измерительных систем (НС КИС), позволяющая оперативно обнаруживать нештатные ситуации. Человеко-машинное взаимодействие строится на базе технологий образного представления больших объемов информации контролируемых объектов, способствующих быстрому принятию решений. Существенный вклад в развитие методов когнитивной графики, визуализации и управления отображением информации внесен отечественными исследователями. К ним следует отнести Д.А. Поспелова, А.А. Зенкина, А.А. Башлыкова, М.Н. Бурдаева, В.Г. Гришина, А.Ю. Зиновьева, В.Л. Горохова и др. Среди зарубежных исследований можно выделить работы R.M. Axelrod, H. Janetzko, H. Song, D.E. Kieras, T. Höllt, F. Fischer и др.

Среди исследователей, занимающихся вопросами проектирования интерфейса, наиболее известными являются J. Raskin, A. Cooper, J. Nielsen, С. Жарков, В.В. Головач, С.Ф. Сергеев и др.

К сожалению, новые технологии по ряду причин внедряются крайне медленно в отечественную космическую отрасль. В настоящее время нет единых принципов построения системы когнитивных образов, способных нести пользователям в обобщенных, наглядных, легко и надежно воспринимаемых формах большие объемы и интенсивные потоки информации. Как правило, образы создаются индивидуально с учетом конкретной прикладной области и интерпретируются экспертом на основе накопленных знаний. Существующие многочисленные графические образы требуют тщательного изучения, количественной оценки с привлечением различных критериев и адаптации к динамическим системам реального времени (ДС РВ) космического назначения, имеющим сложную иерархическую структуру. На данный момент систематические исследования когнитивных графических образов пока не выполнены в полном объеме, что препятствует их внедрению в рассматриваемой прикладной области. В связи с этим, основной задачей настоящей диссертационной работы является разработка новых математических методов анализа и визуализации многомерных данных для использования в составе перспективных графических интерфейсов НС КИС. Актуальным является проведение комплексного исследования в области методов когнитивной визуализации состояний многопараметрических динамических объектов и создание на этой основе новых подходов к построению интерфейсов человеко-машинного взаимодействия в космической отрасли.

Объектом исследования являются методы когнитивной машинной графики, процессы обработки, визуализации и когнитивного анализа телеметрической информации.

Предметом исследования являются методы оценки качества графических образов и алгоритмы преобразования многомерных данных в когнитивные графические образы применительно к различным классам космических подсистем, повышающие объективность и оперативность принятия решений.

Целью исследования является создание методов информационной поддержки операторов НС КИС за счет образного представления больших объемов многомерных данных средствами когнитивной машинной графики.

Задача исследования – разработка когнитивных компонент к графическим интерфейсам для операторов систем контроля, диагностики и обработки информации НС КИС, отображающих в интерактивном режиме результаты обработки данных и текущую ситуацию в виде когнитивных образов.

В соответствии с задачей исследования в диссертационной работе ставятся и решаются частные подзадачи:

1. Анализ и классификация графических образов для контроля и определения состояний космических подсистем.

2. Выделение, оценка качества и ранжирование информативных параметров для построения когнитивных графических образов радиотехнических сигналов.

3. Анализ корреляционных связей в показаниях датчиков положения и ориентации космического аппарата с одновременной визуализацией ситуации с помощью 3D-модели космического аппарата (КА) для оперативного обнаружения сбоев, помех и неисправностей в работе средств измерений.

4. Разработка методов и программного обеспечения для визуального контроля потоков данных телеметрии на основе математических представлений и когнитивного отображения информации в виде когнитивного дополнения к интерфейсам космического назначения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы когнитивной графики, методы и критерии визуальной аналитики, методы распознавания образов, имитационного моделирования, аналитической геометрии и алгебры.

Область исследования. Содержание диссертации соответствует следующему пункту паспорта специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей» (технические науки): п.7 «Человеко-машинные интерфейсы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения».

Научная новизна. Научная новизна заключается в разработке методов оценки и автоматического построения когнитивных образов в составе интеллектуальных интерфейсов, предоставляющих новые возможности человеку-оператору в решении задач определения состояний сложных объектов по многомерным параметрам в режиме реального времени. В том числе:

1. Метод комплексной формальной оценки когнитивных образов, предназначенный для выбора оптимального способа отображения контролируемой ситуации в работе сложного технического объекта.

2. Комплекс новых когнитивных образов для отображения и распознавания сложных сигналов с космических аппаратов на основе специальных сверток кортежей упорядоченных по информативности параметров.

3. Метод построения универсальных иерархических графических образов на основе циклоид, обеспечивающих, в отличие от существующих способов контроля, повышение информативности представления динамической ситуации за счет одновременного отображения классов текущего и предыдущих состояний подсистем космических аппаратов.

4. Новые двухуровневые когнитивные образы отображения состояния аппаратуры НС КИС для интеллектуальных интерфейсов наземных станций командно-измерительных систем, повышающие наглядность и скорость интерпретации текущей динамической ситуации.

Положения, выносимые на защиту:

- метод когнитивно-графического представления радиотехнических дискретных сигналов, основанный на ранжировании информативных признаков;

- метод иерархического представления универсальных когнитивных образов на основе циклоид, позволяющий контролировать приближение значений параметров к границам допустимого рабочего диапазона;

- метод визуализации информации в графическом интерфейсе НС КИС в виде динамических двухуровневых когнитивных образов, отвечающих требованиям эргономичности и обеспечивающих повышение скорости восприятия и понимания текущей ситуации;

- метод комплексной формальной оценки когнитивных образов, предназначенных для поддержки наблюдения оператором за состоянием сложной ДС РВ.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные когнитивные образы позволяют улучшить эргономические качества интерфейсов для объектов космической отрасли и повысить эффективность работы лица, принимающего решение (ЛПР). Основные достоинства разработанных методов графической поддержки: наглядность интерпретации и надежность контроля телеметрии; возможность автоматического определения состояний объектов по многомерным параметрам на всех уровнях иерархии ДС РВ; легкость восприятия больших объемов и интенсивных потоков информации в реальном масштабе времени. Предложенные методы визуализации позволяют контролировать приближение значений параметров к границам допустимого рабочего диапазона. Информативность образов увеличена путем одновременного отображения как класса текущего состояния, так и классов нескольких предыдущих состояний параметров, подсистем объектов и объектов контролируемой системы.

Достоверность результатов подтверждена математическими выкладками, практической реализацией когнитивных образов и их испытанием на реальных потоках данных с космических аппаратов.

Апробация работы. Результаты работы прошли апробацию на всероссийских научных конференциях:

1) Научно-практической совместной конференции студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников Института программных систем Российской академии наук и «Университета города Переславля» им. А.К. Айламазяна (Переславль-Залесский, 2008 г.);

2) XI и XIII Научно-практических конференциях Университета города Переславля (Переславль-Залесский, 2007 и 2009 гг.);

3) III, IV, V и IX Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2010, 2011, 2012 и 2018 гг.);

4) IV Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Информатика, управление и системный анализ» (Тверь, 2016 г.);

5) V Национальном Суперкомпьютерном Форуме (НСКФ-2016) (Переславль-Залесский, 2016 г.).

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах лабораторий ИПС им. А.К. Айламазяна РАН, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, на Секции №2 Интеллектуальный анализ неструктурированной информации Конференции «Искусственный интеллект: проблемы и пути решения» (парк «Патриот», 15 марта 2018 г.).

Внедрение. Основные результаты диссертационной работы использовались:

1) при выполнении СЧ НИР «Исследования и разработка архитектурных и программных технических решений и создание экспериментального образца нейросетевой системы мониторинга состояния и поведения подсистем космических аппаратов по телеметрическим данным в условиях натурной отработки с полнотой и точностью распознавания ситуации при использовании нейросетевого классификатора в задачах диагностики не менее 85 процентов», шифр «Мониторинг-СГ-1.2.5.1» (2014-2017) по Программе Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» (получен Акт об использовании (внедрении) результатов диссертационной работы от 12.09.2017 г.);

2) при выполнении НИОКР «Создание прикладной интеллектуальной системы информационной поддержки НС КИС», этап 2: «Разработка и экспериментальная реализация интеллектуального интерфейса для информационной поддержки НС КИС» по договору № 07-15/2007 с ИПС им. А.К. Айламазяна РАН (получен Акт об использовании (внедрении) результатов диссертационной работы от 18.08.2017 г.);

3) при выполнении ОКР «Разработка прототипа программной нейросетевой системы контроля телеметрической информации, диагностики

подсистем космических аппаратов, обработки космических снимков», шифр «Нейросеть» (2008-2011) по Программе Союзного государства «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» (получено Свидетельство о государственной регистрации ПЭВМ № 2012613261).

Публикации. Основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, опубликованы в 26 печатных работах; из них 8 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов кандидатских диссертаций. Получено 4 Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Опубликована совместная монография: Бурдаев М.Н., Емельянова Ю.Г., Хачумов В.М. Когнитивная машинная графика в системах космического и медицинского назначения / под общ. ред. М.Н. Бурдаева. М.: Ленанд, 2019. 256 с. (8,98 п.л./4,08 п.л.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст содержит 168 страниц, 56 рисунков, 26 таблиц. Список литературы содержит 16 страниц и включает 142 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулирована цель работы и приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава посвящена анализу методов построения когнитивных графических дополнений и образов к человеко-машинным интерфейсам. Выполнена классификация современных решений в области когнитивной визуализации данных и выявлены их недостатки. Сформулированы требования к когнитивным графическим образам, предназначенным для визуализации текущего состояния в ДС РВ со сложной иерархической структурой. Введены основные определения «когнитивная графика», «когнитивно-графический интеллектуальный интерфейс», «когнитивно-графическое представление ситуации».

Назначение когнитивной графики применительно к НС КИС – преобразование вида $f : C \rightarrow G$, где C – множество контролируемых данных или ситуаций, G – множество графических образов, описывающих ситуации в удобной для восприятия ЛПР форме. Источниками данных для разрабатываемых когнитивных компонент служат космический аппарат и наземная станция командно-измерительных систем.

Преобразование ситуации f в когнитивный образ G должно удовлетворять требованию максимизации функционала

$$\Phi(G) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \Phi_i(G) - \sum_{i=m+1}^n \lambda_i \Phi_i(G) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $\Phi_i(G) = \Phi_i(f(C))$ – числовые оценки качественных показателей когнитивного образа (нормированные частные критерии), λ_i – весовые коэффициенты критериев, $\lambda_i \geq 0$ и $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

Многомерные данные с помощью ЭВМ могут быть соотнесены в когнитивный графический образ в виде интегральных функциональных профилей или сцен, отражающих особенности состояния объекта. Результаты анализа рассмотренных методов сведены в Таблицу 1.

Таблица 1.

Сравнение методов когнитивного представления ситуаций (фрагмент)

№	Название, автор	Назначение	ДСРВ	Сложные иерархии	Контроль уровня отклонения	Универсальность
1	Многомерный образ сердечно-сосудистой системы, Кочеткова И.А.	Распознавание образов	-	-	+	-
2	n-симплекс, Янковская А.Е.	Распознавание образов	-	+	+	+
3	Звезда, Гришин В.Г	Распознавание образов	+	-	-	+
4	Ядро с лучами, Вагин В.Н., Еремеев А.П.	Отображение аномалий и текущей ситуации	+	+	+	+
5	Фрактал, Новоселов Ю.В.	Отображение аномалий и текущей ситуации	+	+	-	+
6	Образ для системы поддержания избыточного давления в баке КА, Ксенофонтова Е.В.	Отображение аномалий и текущей ситуации	+	+	+	-
7	Образ для операторов атомных электростанций, Башлыков А.А.	Отображение аномалий и текущей ситуации	+	+	+	-
8	Годограф, Бурдаев М.Н.	Контроль и управление КА	+	+	+	-

Рассмотренные в Таблице 1 методы не подходят в существующем виде для визуализации и контроля параметров КА и НС КИС в силу того, что не отвечают всем сформулированным и заявленным требованиям. Поэтому требуется выполнить более тщательный анализ, а именно:

1) проанализировать методы оценки графических пользовательских интерфейсов и информационных панелей и разработать методику комплексной оценки когнитивных графических образов;

2) выделить классы графических образов в соответствии со спецификой контроля космических объектов и их подсистем;

3) разработать методы автоматического формирования когнитивного графического представления информации в реальном времени для поддержки принятия решений в НС КИС, удовлетворяющие всем предъявляемым требованиям;

4) реализовать программно интерфейс для НС КИС с когнитивным дополнением, обеспечивающим формирование и анализ выделенных классов графических образов.

В диссертационной работе выделены четыре класса объектов контроля, предназначенных для отображения в виде когнитивно-графических образов: 1) радиотехнические сигналы; 2) данные, полученные от датчиков ориентации космического аппарата; 3) телеметрия, полученная от объединенных в орбитальную группировку КА; 4) информация функционального контроля о состоянии аппаратуры НС КИС.

В соответствии с указанными классами объектов предлагается следующая классификация когнитивно-графических образов: «интегральное контурное представление», «когнитивно-мнемонические образы», «когнитивно-иллюстративные образы», «цифровые когнитивно-визуальные образы».

Целью диссертационной работы является: разработка методов автоматического преобразования ситуаций, контролируемых посредством интерфейса НС КИС, в когнитивно-графические образы, обладающие максимальными аддитивными критериями качества, соответствующих сформулированным требованиям и установленным классам объектов.

Во второй главе рассмотрены формальные методы оценки графических пользовательских интерфейсов и информационных панелей, пригодных для вычисления количественных показателей когнитивных графических образов. Получены формулы для вычисления показателей качества когнитивно-графических образов. Выполнена оценка применимости анализируемых когнитивных образов к задачам контроля ситуаций в космических системах.

Предложенная совокупность оценок может быть практически использована для сравнения качества различных когнитивных образов с целью выбора наиболее подходящих для применения в составе НС КИС. На основе выявления и обобщения мнений ряда исследователей-экспертов из АО «Российские космические системы», «Научно-исследовательский институт космических систем им. А.А. Максимова» – филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН и НИУ «МЭИ», занимающихся вопросами визуализации, в соответствии с методикой экспертной оценки важности критериев качества, установлена следующая приоритетность количественных показателей когнитивно-графических образов аддитивного критерия (1): 1) ситуационная интерпретируемость аномалии ($\lambda_1 = 0.221$), 2) селективность аномалии ($\lambda_2 = 0.214$), 3) ситуационная интерпретируемость критического состояния ($\lambda_3 = 0.164$), 4) селективность критического состояния

($\lambda_4 = 0.157$), 5) математическое ожидание времени целевого зрительного поиска нужной информации ($\lambda_5 = 0.104$), 6) наглядность ($\lambda_6 = 0.093$), 7) структурность ($\lambda_7 = 0.039$), 8) целостность ($\lambda_8 = 0.025$).

В третьей главе приведены разработанные методы когнитивного графического представления информации для поддержки принятия решений в наземных станциях командно-измерительных систем. Приведены результаты исследования по преобразованию в визуальные образы следующей информации: радиотехнические сигналы, данные телеметрии о состоянии подсистем КА, показания датчиков ориентации КА, информация функционального контроля НС КИС, процесс решения прикладной задачи.

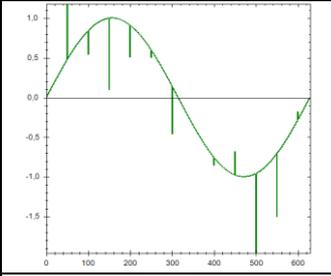
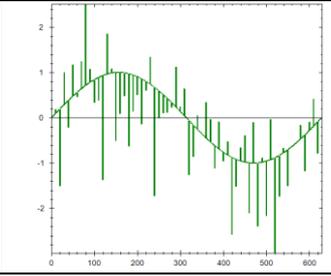
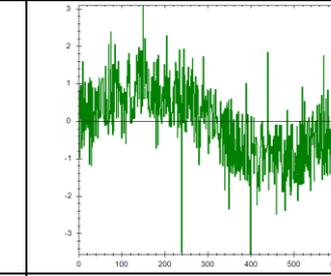
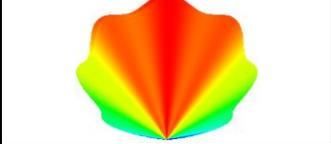
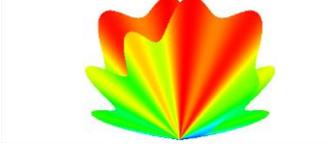
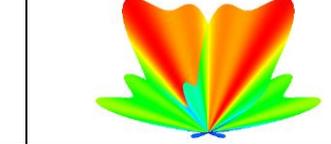
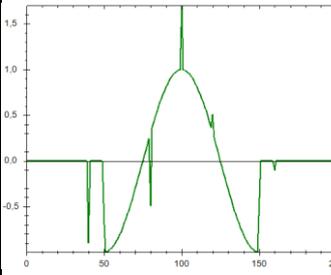
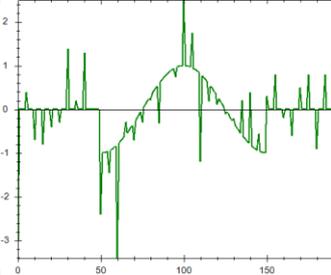
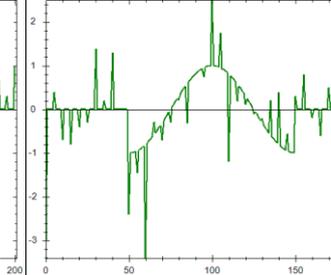
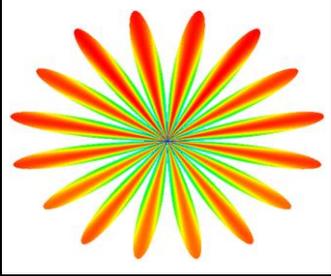
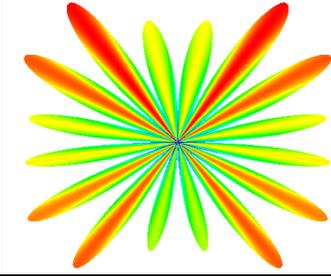
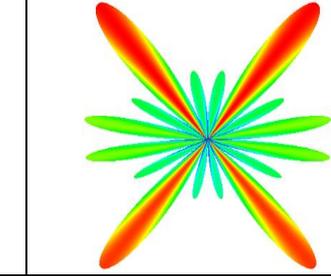
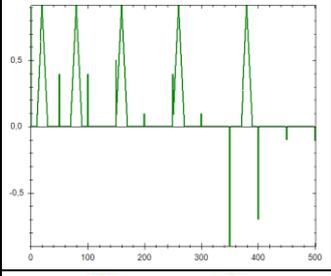
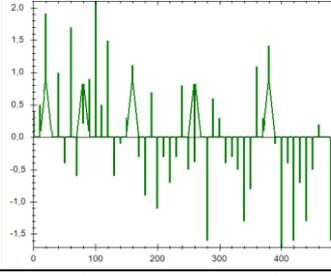
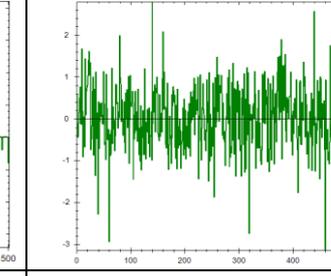
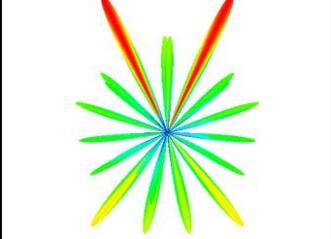
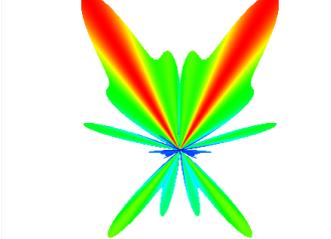
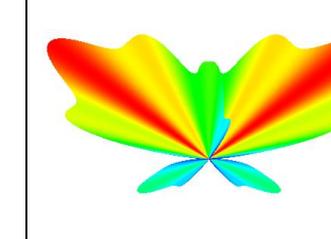
1. Метод когнитивно-графической визуализации радиотехнических сигналов

Разработан метод графического представления временных последовательностей, позволяющий визуально классифицировать радиотехнический сигнал и обнаружить шум в этом сигнале. Анализ сигналов проведен в несколько этапов: 1) определение числовых признаков типовых сигналов; 2) ранжирование и отбор признаков, формирующих наиболее информативный когнитивный графический образ; 3) построение графических образов, визуализирующих многомерный вектор из признаков сигнала. На первом этапе вычисляется 40 информативных параметров сигнала, среди которых: интервал корреляции, динамический диапазон, максимальная пропускная способность канала, интеграл вероятности, среднеквадратическое значение напряжения шума.

Для построения когнитивно-графических образов сигналов используется метод интегрального контурного представления по методу полярной развертки. Выбран вариант такого представления, определяющийся формулой $\rho(\varphi) = \sum_{k=1}^n x_k \sin(k\varphi)$, где ρ и φ – полярные координаты точек контура, x_k – значения информативных признаков, k – номер признака, $0 \leq \varphi < 360$. Перестановки координат в векторе $x = (x_1, \dots, x_n)$ могут существенно изменять возможности обнаружения отличий между когнитивными образами для разнотипных сигналов. Так как представление одним контуром более двадцати-тридцати различных x_k является неэффективным, то следует снизить размерность признакового пространства. Ранжирование признаков по убыванию информативности повышает селективность полярной развертки кривой со спектром, задаваемым вектором x . Выполнено ранжирование признаков сигнала по их информативности на основе алгоритмов Add и Del, что позволило отобрать восемь наиболее информативных параметров и получить наиболее выразительные когнитивные образы дискретных сигналов.

Введена операция вычитания сигналов, определенная над их признаками: $\rho_{\text{разн}}(\varphi) = \sum_{k=1}^n (x_k - x_{k\varepsilon}) \sin(k\varphi)$, где $x_{k\varepsilon}$ – k -ый эталонный признак сигнала. Выполним соответствующую визуализацию $\rho_{\text{разн}}(\varphi)$ (Таблица 2). Для усиления восприятия в контурные представления разностных образов введены цветояркие компоненты и приведено расстояние Евклида-Махаланобиса до эталонных сигналов в принятом признаковом пространстве.

Результаты визуализации разности сигналов

1) Синусоида			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.42103	0.49166	0.63687
2) Радиопульс			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	1.00158	1.05363	1.28052
3) Последовательность треугольных импульсов			
График сигнала			
Когнитивный образ сигнала			
Расстояние	0.00080	0.04794	1.16605

Из таблицы виден характер чувствительности когнитивных образов к существенным зашумлениям сигналов, оцениваемых с помощью введенного расстояния. Это выражается в изменении формы и цветовых представлений. Понятно, что различить образы сможет только оператор НС КИС, прошедший соответствующее обучение.

2. Метод когнитивной визуализации данных с датчиков положения

Пусть имеется набор показаний датчиков космического аппарата. Будем рассматривать показания датчиков ориентации КА как случайные величины. Степень взаимосвязи величин X и Y будем измерять коэффициентом

корреляции $r(X, Y) = \frac{cov[X, Y]}{\sqrt{D[X]D[Y]}}$, где $cov[X, Y]$ – ковариация случайных величин X и Y , $D[X]$ – дисперсия X , $D[Y]$ – дисперсия Y .

При внесении помех наблюдается снижение значения модуля корреляции в показаниях датчиков. Наличие корреляционных связей в показаниях положения и ориентации объясняет поведение разработанной в диссертации трехмерной модели космического аппарата. Наблюдаемые резкие кратковременные изменения и потеря ориентации модели при нормальном поведении КА свидетельствуют о наличии сбоев в датчиках в результате воздействия внешних помех. Устойчивое аномальное положение модели указывает в явном виде на неисправность. По результатам исследований разработана программа, способная выполнять предобработку показаний датчиков и обеспечивать анимационный графический вывод данных в составе универсального интерфейса НС КИС. Корреляционный анализ данных в сочетании с простой 3D-моделью летательного аппарата служит хорошим инструментом для анализа состояния датчиков.

3. Когнитивное представление состояния КА

По результатам обзора требований к когнитивным графическим образам для операторов ДС РВ разработана трехуровневая система универсальных когнитивных образов: первый уровень представляет собой образ для группы контролируемых объектов, составляющих в своей совокупности комплексную ДС РВ; на втором уровне отображается состояние отдельного объекта; на третьем – визуализируются параметры рассматриваемого объекта, сгруппированные в подсистемы.

Сформулируем постановку задачи в математической форме. Будем называть группировку КА комплексной системой S . Пусть $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_t, \dots, \zeta_n\}$ – множество состояний S в дискретные отсчеты времени t . Система S включает μ контролируемых объектов, т.е. $S = \{S_1, S_2, \dots, S_\omega, \dots, S_\mu\}$. Объект S_ω состоит из k подсистем, т.е. $S_\omega = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_k\}$. Состояние подсистемы s_i характеризуется набором из значений m параметров, т.е. $s_i(t) = \{p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{ij}(t), \dots, p_{im}(t)\}$, где $p_{ij}(t)$ – значение j -го параметра подсистемы с номером i в дискретный отсчет времени t . Каждый параметр p_{ij} имеет допустимый рабочий диапазон $[p_{ij \min}, p_{ij \max}]$.

В секторах когнитивного образа располагаются фигуры, ограниченные дугой окружности и какой-либо из кривых: ветвь эпициклоиды, ветвь гипоциклоиды, эллиптическая дуга или ветвь гиперболы. Размер фигуры соответствует величине отклонения параметра от среднего значения на допустимом рабочем диапазоне. Отображение значений параметров в дуги кривых выполняется по формуле:

$$\begin{cases} x = x_0 + \left(R + \overline{p_{ij}(t)}\right) \cos \psi - \overline{p_{ij}(t)} \cos(m + \eta) \psi \\ y = y_0 + \left(R + \overline{p_{ij}(t)}\right) \sin \psi - \left|\overline{p_{ij}(t)}\right| \sin(m + \eta) \psi \end{cases}, \text{ если } -r \leq \overline{p_{ij}(t)} \leq r$$

$$\begin{cases} x = x_0^e + a^e \cos \beta \cos \tau - b^e \sin \beta \sin \tau \\ y = y_0^e + a^e \cos \beta \sin \tau + b^e \sin \beta \cos \tau \end{cases}, \text{ если } \bar{z}_j > r, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + a^h \cosh \theta \cos \tau - b^h \sinh \theta \sin \tau \\ y = y_0 + a^h \cosh \theta \sin \tau + b^h \sinh \theta \cos \tau \end{cases}, \text{ если } \bar{z}_j < -r$$

где $\overline{p_{ij}(t)}$ – нормированное значение j -го параметра подсистемы с номером i в

дискретный отсчет времени t , $\overline{p_{ij}(t)} = \delta \left(2 \left(\frac{p_{ij}(t) - p_{ij \min}}{p_{ij \max} - p_{ij \min}} \right) - 1 \right)$, $\delta = \frac{R}{2\Phi^2}$, Φ –

коэффициент золотого сечения, R – радиус окружности, x_0 и y_0 – координаты центра окружности, m – количество параметров в i -ой подсистеме, $r = R/m$, $\psi \in [j\alpha, (j+1)\alpha]$, $\alpha = 2\pi/m$, $\tau = j\alpha + \alpha/2$ – угол поворота эллипса или гиперболы вокруг точки $O(x_0, y_0)$, $x_0^e = x_0 + R \cos(\alpha/2) \cos \tau$,

$y_0^e = y_0 + R \cos(\alpha/2) \sin \tau$, $a^e = 2\overline{p_{ij}(t)} + R - R \cos \frac{\alpha}{2}$ – большая полуось эллипса,

$b^e = R \sin \frac{\alpha}{2}$ – малая полуось эллипса, $a^h = R + 2\overline{p_{ij}(t)}$ – действительная полуось

гиперболы, $b^h = \frac{a^h R \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{\left(R \cos \frac{\alpha}{2}\right)^2 - (a^h)^2}}$ – мнимая полуось гиперболы, $\theta \in [-2\pi, 2\pi]$

$$\beta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right], \eta = \begin{cases} 1, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} > 0 \\ -1, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} < 0 \\ 0, & \text{если } \overline{p_{ij}(t)} = 0 \end{cases}$$

Области, ограниченные дугой окружности и кривой (2), закрашиваются тем цветом, который соответствует параметру $p_{ij}(t)$ по определенным правилам. Образы для групп контролируемых параметров КА «Юбилейный» (по данным ЦУП малых космических аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана) представлены на Рисунке 1.

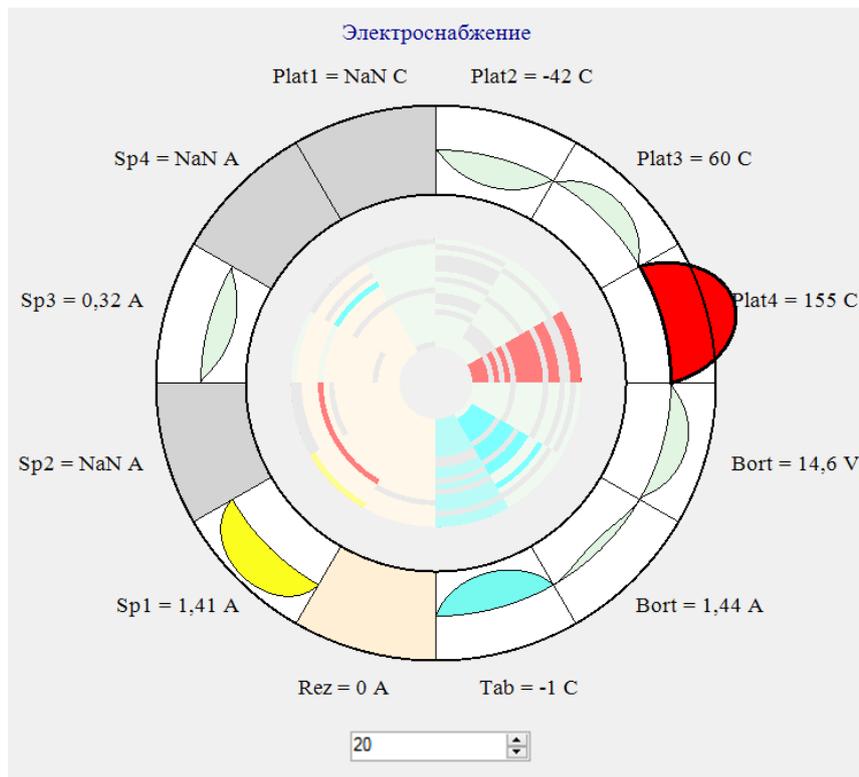


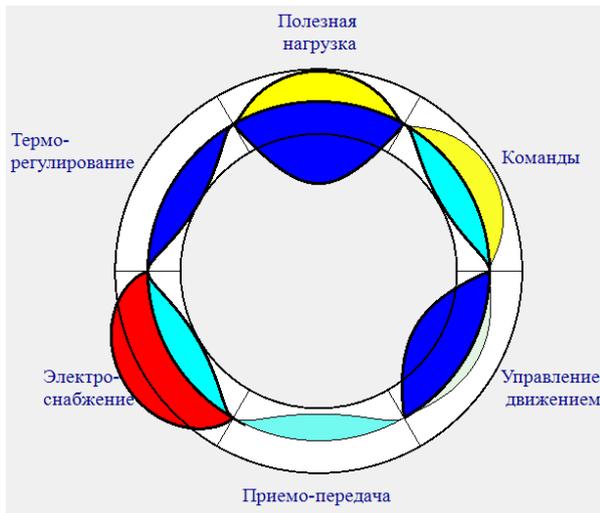
Рисунок 1. Отображение параметров, сгруппированных в подсистемы

В каждом секторе когнитивного образа отображаются классы нескольких предыдущих состояний той части системы, которую представляет данный сектор (параметр, подсистема объекта, объект). Для каждого класса параметров приняты свои цветовые обозначения. На Рисунке 1 видно, что за предыдущие 20 временных отчетов сила тока на первой и второй панели солнечной батареи (Sp1, A Sp2, A) совершила скачок, превышающий заданное максимальное допустимое значение.

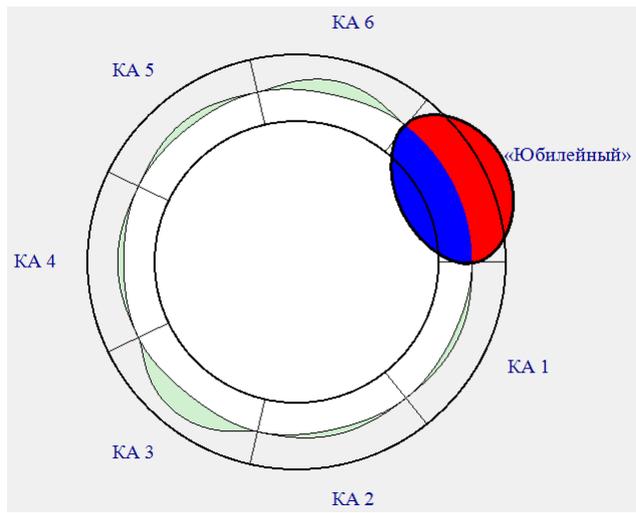
Пусть $p_{i \min}(t)$ – минимальное среди нормированных отрицательных значений параметров подсистемы S_i , зафиксированных в момент времени t и $p_{i \min}(t) \in \{\overline{p_{i1}(t)}, \dots, \overline{p_{ij}(t)}, \dots, \overline{p_{im}(t)}\}$; $p_{i \max}(t)$ – максимальное значение среди нормированных положительных параметров, $p_{i \max}(t) \in \{\overline{p_{i1}(t)}, \dots, \overline{p_{ij}(t)}, \dots, \overline{p_{im}(t)}\}$, k – количество подсистем в объекте.

Выполнив подстановки: $\overline{p_{ij}(t)} = p_{i \min}(t)$, $j = i$, $m = k$, получим кривую для минимального значения параметра в подсистеме. Выполнив подстановки: $\overline{p_{ij}(t)} = p_{i \max}(t)$, $j = i$, $m = k$, получим кривую для максимального значения параметра в подсистеме.

Для контроля телеметрии КА «Юбилейный» получен образ, представленный на Рисунке 2 а. Из Рисунка 2 а видно, что контролируемый объект находится в аварийном состоянии, так как состояния всех его подсистем обозначены яркими цветами, что говорит о нарушениях режима, установленного технической документацией.



а) когнитивный образ КА «Юбилейный»

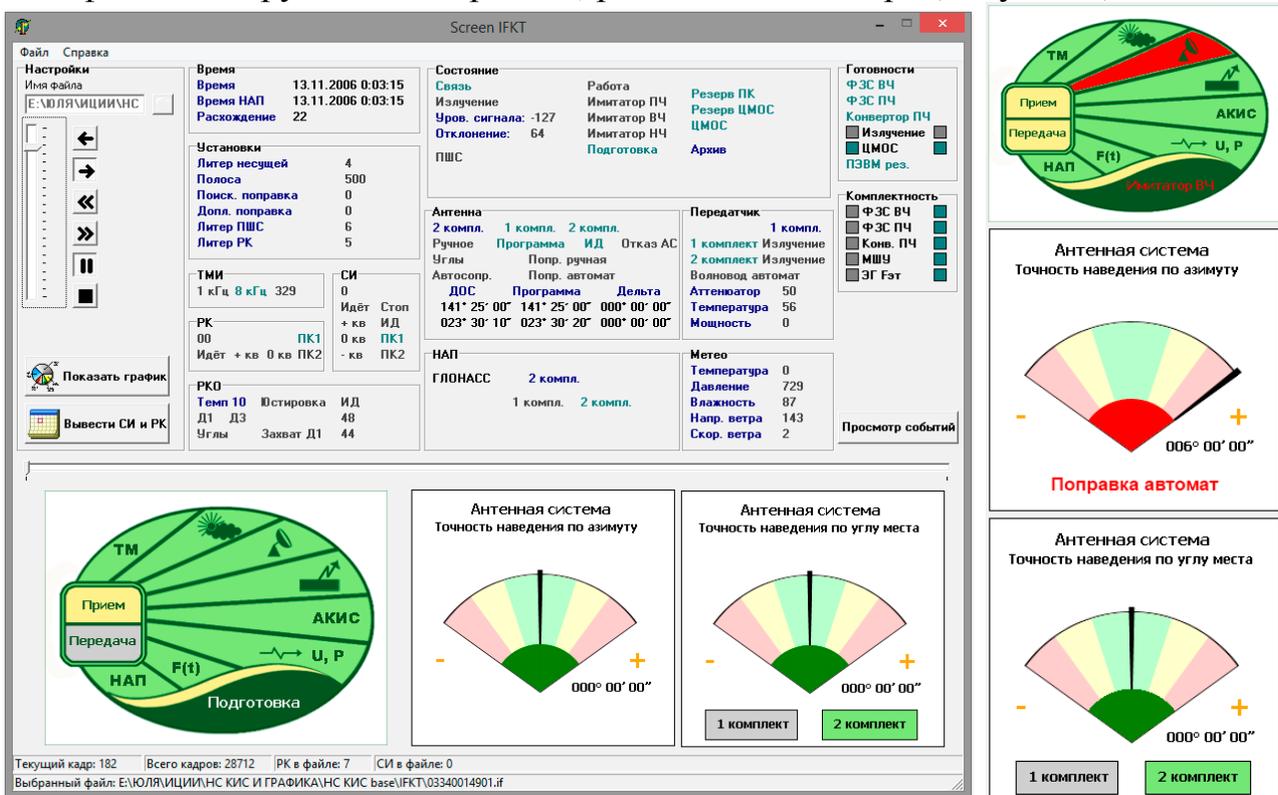


б) когнитивный образ группировки КА

Рисунок 2. Когнитивные образы отдельного КА и группировки

Предлагается для визуализации уровня комплексной системы формировать такое же когнитивное графическое изображение, как и для уровня отдельного объекта. На Рисунке 2 б представлен когнитивный образ для группировки космических аппаратов. Видно, что один из космических аппаратов, входящих в наблюдаемую группу, работает в нештатном режиме.

В четвертой главе рассмотрены решения по созданию интеллектуального интерфейса для НС КИС. Разработано обобщенное когнитивное представление состояния системы космического назначения. Цветояркий образ является модификацией круговой диаграммы, разбитой на сектора (Рисунок 3).



а

б

Рисунок 3. Интерфейс НС КИС с когнитивным дополнением

Каждый сектор отвечает за один из пунктов контролируемых данных. Появление аномального значения какого-либо из контролируемых параметров влечет изменение цвета сектора, отвечающего за соответствующую этому параметру подсистему.

На Рисунке 3 а показан вид интерфейса перспективной НС КИС с когнитивным дополнением. При выборе одного из секторов появляются уточняющие образы, на которых можно просмотреть информацию о его работе. Если какой-либо из параметров вышел из нормы, то оранжевый или красный цвет сектора дает знать о том, где обнаружены аномалии. В качестве примера на Рисунке 3 б рассмотрена ситуация, при которой наведение антенной системы нуждается в поправке из-за больших отклонений в положении.

К универсальному интерфейсу НС КИС дополнительно подключается когнитивная модель космического аппарата. Экспериментальное программное обеспечение, реализующее когнитивное дополнение, встроено и испытано в составе НС КИС. Возвращаясь к общей оценке качества предлагаемых когнитивных образов, ограничимся восемью наиболее важными характеристиками (Таблица 3).

Таблица 3.

Сравнительные характеристики когнитивно-графических образов

Качественный показатель	Название образа, автор			
	Фрактал	Ядро с лучами	Циклоидальный образ	Образы для НС КИС
Ситуационная интерпретируемость аномалии	0.001	0.009	0.622	0.049
Ситуационная интерпретируемость критического состояния	0.001	0.104	0.183	0.135
Структурность	0.999	0.976	1	0.928
Наглядность	0.428	0.604	0.642	0.428
Селективность аномалии	0.954	0.874	0.843	0.848
Селективность критического состояния	0.991	0.963	0.851	0.845
Мат. ожидание времени целевого зрительного поиска	0.113	0.236	0.321	0.2
Целостность	1	0.985	0.978	0.816
Аддитивный критерий	0.452	0.451	0.571	0.422

Из таблицы видно, что разработанный автором циклоидальный образ получил наиболее высокое значение аддитивного критерия. Образы для НС КИС сравнимы по качеству с «фракталом Новоселова» и «ядром с лучами».

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты работы

1. Выполнен анализ методов построения когнитивных графических дополнений и образов к человеко-машинным интерфейсам для повышения эффективности работы операторов НС КИС, выявлены их преимущества и недостатки. Определены основные классы космических подсистем и введены соответствующие им графические образы, установлены эргономические требования к графическим пользовательским интерфейсам.

2. Разработан метод комплексной формальной оценки когнитивных образов, предназначенный для выбора оптимального способа отображения контролируемой ситуации в работе сложного технического объекта.

3. Разработан и исследован метод когнитивно-графического представления временных последовательностей для визуального обнаружения человеком-оператором шумов в радиотехнических сигналах.

4. Разработаны и исследованы новые многоуровневые когнитивные графические образы на основе циклоид и интегрального контурного представления, обеспечивающие повышение информативности визуализации динамической ситуации в КА и их коалициях за счет одновременного отображения классов текущего и предыдущих состояний подсистем космических аппаратов.

5. Разработано и внедрено программное обеспечение в виде когнитивного дополнения к интерфейсам перспективных НС КИС космического назначения.

Основные публикации

1. Емельянова Ю.Г. Графический анализ информации в системах космического назначения // Программные продукты и системы. 2009. № 2. С. 45-49. (0.48 п.л.).

2. Емельянова Ю.Г., Теплоухова Н.Е. Моделирование и когнитивно-графическое представление радиотехнических сигналов в системах обучения эксплуатирующего персонала // Авиакосмическое приборостроение. 2011. № 9. С. 21-30. (0.57 п.л./0.24 п.л.). (Личный вклад: выполнен отбор информативных параметров для построения когнитивных образов радиотехнических сигналов; предложен метод когнитивного графического отображения радиотехнических сигналов).

3. Емельянова Ю.Г. Разработка методов когнитивного отображения состояний динамических систем реального времени // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 3. С. 21-30. (0.92 п.л.).

4. Методы, модели и программные средства обработки данных космического мониторинга Арктической зоны / Ю.Г.Емельянова [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 7. С. 38-51. (0.95 п.л./0.15 п.л.). (Личный вклад: разработана функциональная модель когнитивной визуализации данных, отображаемых в интерфейсе наземной станции командно-измерительных систем; разработан подход к когнитивному отображению состояния подсистем космического аппарата).

5. Емельянова Ю.Г., Фраленко В.П., Хачумов В.М. Методы комплексного оценивания когнитивных графических образов // Программные системы: теория и приложения. 2018. № 3. С. 49-63. (0.48 п.л./0.39 п.л.). (Личный вклад: предложены численные критерии качества когнитивных графических образов и выбраны методы их вычисления).

6. Емельянова Ю.Г., Фраленко В.П. Методы когнитивно-графического представления информации для эффективного мониторинга сложных технических систем // Программные системы: теория и приложения. 2018. № 4. С. 117-158. (1.43 п.л./1.21 п.л.). (Личный вклад: выполнен анализ методов построения когнитивных графических дополнений к человеко-машинным интерфейсам; выполнена классификация современных решений в области когнитивной визуализации данных и выявлены их преимущества и недостатки; сформулированы требования к когнитивным графическим образам, предназначенным для визуализации текущего состояния сложных технических объектов).

7. Современные человеко-машинные интерфейсы управления авиационными и космическими системами / Ю.Г.Емельянова [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 1. С. 38-46. (0.59 п.л./0.15 п.л.). (Личный вклад: выполнен обзор современных человеко-машинных интерфейсов для управления сложными авиационными и космическими системами).

8. Емельянова Ю.Г., Фраленко В.П., Шишкин О.Г. Автоматическое восстановление пропущенных, исправление поврежденных и эмуляция данных телеметрии космического аппарата // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 5. С. 47-51. (0.5 п.л./0.1 п.л.). (Личный вклад: разработаны средства коррекции данных от датчиков космического аппарата с целью последующего их использования для образного анализа текущей ситуации).

9. Emelyanova Yu.G., Khachumov V.M. Cognitive Graphical Additions to the Interfaces of Command Measurement Systems for Aerospace Application // Russian Aeronautics. 2018. Issue 1. P. 112-119. (0.5 п.л./0.32 п.л.). (Личный вклад: разработаны конкретные когнитивные образы для визуализации данных в составе интеллектуальных интерфейсов систем космического назначения).