COMPUTER-AIDED ENGINEERING

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 004.9

А.Н. Пифтанкин, А.В. Половинкина, Т.Е. Кузнецова

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ТИПА С4И

Пифтанкин Александр Николаевич, кандидат технических наук, окончил механико-математический факультет Ульяновского государственного университета. Главный специалист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области автоматизации процессов совокупной обработки радиолокационной информации, планирования действий и управления истребительной авиацией. [e-mail: mars@mv.ru].

Половинкина Анастасия Владимировна, кандидат физико-математических наук, окончила факультет математики и информационных технологий УлГУ. Инженер-программист 1 категории ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в области фундаментальных исследований. [e-mail: mars@mv.ru].

Кузнецова Татьяна Евгеньевна, окончила факультет математики и информационных технологий УлГУ. Инженер-программист 1 категории ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Область научных интересов: анализ разработки систем двойного назначения. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к разработке сложных систем, в том числе систем С4И (Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence). На примере различных подходов, предлагаемых к использованию в системах гражданского назначения. Приводится обоснование необходимости систем двойного назначения и возможные типы участников – систем, взаимодействующих с системой типа С4И. Предлагаются подходы к разработке программного обеспечения систем данного типа на этапах анализа предметной области и проектирования. В работе представлены алгоритм формирования иерархической структуры функций программного обеспечения на основе дендритного метода, пример алгоритма процесса разработки программного обеспечения, а также методика использования шаблонов на примере программных комплексов ведения обстановки и обеспечения боевой и технической готовности. В отличие от большинства публикаций открытых источников по данной проблемной области, предлагаются подходы, позволяющие применить методы иерархической кластеризации при декомпозиции программного обеспечения.

Ключевые слова: системы двойного назначения, анализ подходов к разработке сложных систем, иерархическая кластеризация.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-3-61-114-123

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF DUAL-PURPOSE SYSTEMS OF C4I TYPE

Aleksandr Nikolaevich Piftankin, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Ulyanovsk State University; Chief Specialist at Federal Research-and-Production Center Joint Stock Company 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of automation of complex radar information processing, planning of fighter aircraft actions and control processes e-mail: mars@mv.ru.

Anastasiia Vladimirovna Polovinkina, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics; graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies of Ulyanovsk State University; Software Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of fundamental research. e-mail: mars@mv.ru.

Tatiana Evgenevna Kuznetsova, graduated from the Faculty of Mathematics and Information Technologies of Ulyanovsk State University; Software Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; the area of her scientific interests relates to the dual-purpose system engineering. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article deals with approaches to complex system development, including C4I systems (Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence) in terms of various approaches suggested for civilian systems. It substantiates the relevance of dual-purpose systems and possible types of subscribers interacting with C4I system. Approaches to software engineering for such systems during analyzing the subject area and designing are suggested. The article considers an algorithm of arranging software functions in hierarchical order based on dendritic method; it also gives an example of algorithm for software engineering and the procedure of using patterns in the systems of situation awareness, and operational and technical readiness as an example. Unlike most of open publishers in this field, the article suggests approaches, which allow using hierarchical clustering in software decomposition.

Key words: dual-purpose systems, analysis of approaches to complex system development, hierarchical clustering.

ВВЕДЕНИЕ

Во все времена мощный флот считался залогом процветания государства. Однако в современном мире с развитием науки и технологий наметилась тенденция к сокращению количества военных кораблей. Например, если во времена Второй мировой войны в составе флотов СССР и США было несколько тысяч кораблей, то на сегодняшний день их количество исчисляется сотнями. В настоящее время флот США насчитывает 10 авианосцев, 9 десантных кораблей, 20 десантных доков, 22 крейсера, 62 эсминца, а России – только 1 авианесущий крейсер, 4 крейсера, 6 эсминцев, 10 больших противолодочных кораблей и 5 сторожевых кораблей [1]. Хотя современные корабли по всем параметрам превосходят свои аналоги времен Второй мировой войны, их число может являться ограничивающим фактором в вопросах обеспечения безопасности. Для получения наиболее полной картины происходящего, кроме военно-морских сил, можно задействовать частные и коммерческие суда, силы охраны правопорядка (см. рис. 1).

Кроме этого, совместное проведение крупномасштабных операций требует наличия единой системы для организации взаимодействия. Для связи в единое целое разнородных систем управления и передачи данных между участниками необходимо создавать систему типа C4I (Command, Control, Communications, Computers, and Intelligence – командование, управление, связь, компьютерные и информационные сети) для поддержки и планирования проводимых операций [2]. Данная

система должна будет обеспечить поддержку принятия решений с помощью применения современных средств обработки информации (компьютеров и средств коммуникации). Одним из главных плюсов такой системы является осведомленность о ситуации, способность обработать огромное количество данных. Основной задачей этой системы является снижение количества привлекаемых сил, уменьшение времени отклика, ускорение проведения операций.

Рассматриваемая система должна объединять различных участников: коммерческие суда, государственные силы охраны порядка, военно-морские силы, частные суда. Если рассматривать автоматизированные системы для каждого из участников по отдельности, то не возникает острых вопросов в формировании кластеров компонент программного обеспечения, так как для каждого из участников в отдельности автоматизированные системы создавались, проходили испытания, модернизировались, что послужило формированию вполне определенной структуры, но только для каждой из систем в отдельности, а не вместе. Распределение функционала по участникам системы C4I показано на рисунке 1.

Для формирования же структуры программного обеспечения для совокупности участников необходимо в первую очередь рассмотреть роли и особенности каждого из них, после чего сформулировать характеристики общей автоматизированной системы.

Частные суда

Одной из главных особенностей системы C4I является использование невоенных средств для получения данных об обстановке. Множество частных судов мож-

Рис. 1. Участники системы C4I

но использовать как средства получения информации. Идентификационные системы (AIS, LRIT), системы оповещения о чрезвычайных ситуациях (GMDSS, INMARSAT), навигационные средства, повсеместно применяющиеся на судах такого класса, постоянно обновляются и имеют широкий спектр возможностей. Эти системы могут являться прекрасным средством обнаружения различного рода угроз и катастроф для скорейшего реагирования.

Коммерческие транспортные суда

Система C4I должна быть спроектирована для предоставления скоординированного отклика на возникающие угрозы. Транспортные суда, перевозящие грузы, такие как нефть, продовольствие, различного рода сырье и потребительские товары, могут стать объектом для нападений со стороны пиратов. С этой точки зрения, коммерческие компании должны выступать как пользователи системы C4I, обеспечивающей быстрый отклик на сложившуюся конфликтную ситуацию. В свою очередь, суда такого класса могут предоставить свои мощности для обеспечения транспортных нужд миссии.

Силы охраны правопорядка

Основной задачей водной полиции, пограничной службы является охрана территориальных вод. Их функции могут быть значительно улучшены при использовании данных, полученных на этапе сбора информации другими участниками. Это помогает оценить доступные для проведения операции ресурсы как на региональном, так и на глобальном уровнях.

Военно-морские силы государств

Будучи одним из самых мощных участников системы, военно-морские силы наиболее требовательны к передаваемой в системе информации из-за сложности международных отношений и постоянно меняющейся политической обстановки. Основной принцип системы заключается не только в силовом применении флотов, но и в привлечении их для решения гуманитарных миссий, таких как ликвидация катастроф. Без помощи военного флота невозможна защита судов других участников от различного рода угроз.

Методология разработки системы C4I

Методология разработки сложных систем как правило базируется на основных процессах жизненного цикла программного обеспечения стандарта ISO/IEC 12207 (требования, проектирование, конструирование, тестирование и сопровождение), а также на процессах поддержки и организации изготовления производства программ (экспертиза, верификация, тестирование), сбора данных об ошибках и отказах, которые используются при оценке разных показателей качества разработанного программного продукта, в частности надежности [3, 4].

С учетом перечисленных возможных участников системы и их различных задач можно отметить следующие особенности системы C4I:

- потенциально большое число участников системы (количество частных и коммерческих судов может су-

щественно превышать количество военных кораблей в рассматриваемом районе);

- более широкий спектр задач по сравнению с типовыми боевыми информационными управляющими системами (удаленное предоставление информации, автоматизированный контроль не боевых задач, доведение сигналов о помощи и поддержке до заинтересованных единиц);

- возможность доработки системы для взаимодействия с различными видами автоматизированных систем различных стран.

Структура программного обеспечения боевых информационных систем, как правило, является устоявшейся и не требует дополнительного исследования подходов к формированию данной структуры. Напротив, структура систем двойного назначения ещё не имеет четкой архитектуры построения, поэтому будет полезно выработать некоторые эффективные подходы к её формированию.

С учетом сложности и эмерджентности системы С4И зачастую проектировщик программного обеспечения не имеет возможности достаточно эффективно формировать программные сущности, устанавливая связи между ними и производить декомпозицию компонент программного обеспечения. Для выявления проблем-

ных мест приведем примерную последовательность действий, характеризующую этапы разработки системы (см. рис. 2).

После получения входных данных начинается их обработка, после которой формируется архитектура будущей системы типа С4И. Для этого используются различные способы получения, преобразования и обработки данных. На первом этапе используется дендритный метод для преобразования требований верхнего уровня в оперативные функции, которые образуют основу для анализа оперативной и системной областей. Далее, оперативная и системная области исследуются с помощью анализа миссий, анализа функций, структурного анализа матриц, анализа проекта матриц и методов оценки стоимости разработки. Результатом работы этих алгоритмов является разработка архитектуры системы и требований по обмену информацией. На различных этапах проектирования, а в большей степени на этапе анализа структуры модели, зачастую бывает недостаточно визуального представления структуры модели, необходимо средство, позволяющее в автоматизированном режиме генерировать структуры с разной степенью детализации и отображать степень связности сгенерированных компонент для корректировки сгенерированной структуры вручную. Таким образом, предлагается конкретизировать каждый из предлагаемых этапов разработки системы и привести математические модели автоматизируемых функций.

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

На первом этапе происходит преобразование требований верхнего уровня в набор операционных функций. Для анализа этих функций используется дендритная модель, чтобы упорядочить и сгруппировать методы взаимодействия внутри системы С4И. Модель выступает в качестве систематизирующего продукта для последующего анализа и выработки решений.

Дендритная модель $M = (F, R)$ основана на структуре данных типа «родитель-потомок», которая декомпозирует функции верхнего уровня на составляющие, где F – множество функций, R – 2-арное отношение между функциями типа «родитель-потомок». Направленные отношения, или логический поток, указаны движением слева направо, начиная с общей родительской функции, которая затем распадается на функции-потомки. На рисунке 3 изображен пример дендритной модели с обобщенными названиями функций.

Алгоритм дендритного метода может состоять из двух этапов: 1 этап – построение матрицы индикации отношений взаимного использования функций, 2 этап – построение дерева дендритной модели. Блок-схемы данных этапов представлены на рисунке 4.

В результате применения данного метода образуются несколько путей развития системы. Как и в древовидной структуре, дендритная модель использует слои организации [5]. Это необходимо для создания уровней функциональной абстракции. Это означает, что каждая

Рис. 2. Процесс разработки системы

Рис. 3. Дендритный метод

из дочерних функций, В1 – В4 и С1 – С4, имеет один и тот же уровень абстракции. Кроме того, функции могут быть как родителями, так и потомками. Например, родительская функция В является и родителем всех дочерних функций В1 – В4, и дочерней для функции А1 (см. рис. 3). По поводу отношения принадлежности между функциями (см. рис. 4) надо дать некоторые пояснения: это отношение является более слабым, чем отношение родитель – потомок, так например, функции А и В1 удовлетворяют отношению принадлежности, хотя и не состоят в отношении родитель – потомок. Пример матрицы принадлежности для схемы (рис. 3) приведен на рисунке 5.

Практическое значение данного метода заключается в выявлении и описании оперативных функций пользователя системы. Дендритная модель является основой для последующих методов анализа.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДЕКОМПОЗИЦИЯ

Функциональное моделирование производится для описания оперативной деятельности (деятельность пользователя, в интересах которого реализуется автоматизация) и системных функций, автоматизирующих действия пользователя. Для представления логики управления и функционального поведения используются функциональные схемы FFBD (Functional Flow Block Diagrams) и расширенные функциональные схемы EFFBD (Enhanced Functional Flow Block Diagrams). FFBD – это многоуровневые диаграммы, представляющие собой функциональные схемы [5]. Для описания сложных систем управления к функциональным схемам добавляются элементы данных. В диаграммах FFBD функции располагаются в порядке их выполнения для проверки согласованности модели и выработки требований к производительности.

Поведение и структура связываются с помощью отношений. Уровень абстракции включает классификацию, взаимосвязь и агрегации [6]. В оперативной и систем-

ной областях таким образом описываются сценарии взаимодействия. В системной области собраны общие функции и методы, обеспечивающие взаимодействие и обмен данными между участниками. В оперативной области рассматриваются задачи и деятельность, свойственные конкретному участнику, а также требования и информация, необходимые для выполнения таких задач. Отношения между оперативной и системной областями в системах С4И показаны на рисунке 6.

На рисунке 7 изображен пример схемы моделирования задач системы С4И. Эта схема должна быть создана в соответствии с целью и ограничениями моделирования. С штриховкой и жирным шрифтом показаны классы и отношения моделируемых объектов, используемых для описания оперативной области. Эта область включает в себя взаимосвязанные архитектуры, оперативные задачи со связанными исполнителями, деятельностью, требованиями. Без штриховки показаны классы и отношения модели объектов, описывающих системную область. Эта область включает в себя взаимосвязанные узлы системы, функции, интерфейсы и функциональные требования.

Примечание: Данные по ТО – данные по тактической обстановки, ПК – программный комплекс, ПО – программное обеспечение, АО – аппаратное обеспечение.

Алгоритм разработки, соответствующий схеме моделирования (см. рис. 7), может быть следующим (рис. 8).

Жирные стрелки показывают направление (последовательность) процесса разработки, а стрелка с тенью соответствие оперативных и системных сущностей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАБЛОНОВ

Методика использования шаблонов объединена с функциональным моделированием как средство придания проверенных характеристик оперативной и системной областям. В данном случае под шаблонами будем понимать часть готовых решений, имеющих постоянную и переменную части. Постоянная часть является

Рис. 4. Блок-схемы алгоритмов дендритного метода

Рис. 5. Матрица принадлежности для дендритного метода

Рис. 6. Оперативная и системная области

шаблоном, предложенным для моделирования. После заполнения переменной части шаблон превращается в готовое решение применительно к конкретной области.

Структура, изображенная на рисунке 6, отражает отношения между оперативной и системной областями. Алгоритм формирования данных структур практически совпадает с алгоритмом, представленным на рисунке 8: отбираем очередную задачу из оперативной области; формируем состав участников, решающих задачу; фор-

мируем состав функций, которые будут использоваться при решении оперативной задачи, для каждого из участников; определяем состав информации обмена между участниками. Таким образом, выявляем все необходимые сущности и связи между ними в системной области. Оперативная область состоит из моделей и шаблонов возможностей. Модели представляют подходы к проведению операций, функции исполнителей в данном контексте. Системная область состоит из описания функций, автоматизирующих деятельность участников и шаблонов их реализации. Модели возможностей представляют повторяющиеся подходы, уточняющие оперативную модель с точки зрения типов организаций, прецедентов, протекания процессов и оперативных или системных функций. Структура отношений между оперативными и техническими шаблонами, а также шаблонами возможностей представлена на рисунке 9.

Шаблоны должны обсуждаться со всеми участниками операции. Для использования шаблона, его оценивают для применения в операционной или системной среде, для которой он предназначен.

На примере программного комплекса ведения обстановки и программного комплекса ведения и контроля обеспечения боевой и технической готовности, боевой подготовки можно привести следующие схемы структуры отношений между оперативными и системными компонентами.

На рисунке 10 представлен оперативный компонент «Ведение обстановки», состоящий из следующих шаблонов возможностей: обнаружение новых объектов обстановки, принятие решения по опасным объектам

Рис. 7. Схема моделирования системы С4I

Рис. 8. Алгоритм процесса разработки

Рис. 9. Структура отношений

обстановки, классификация объектов обстановки, сопровождение целей. Системные (технические) компоненты – это удаление объектов, отождествление объектов, добавление информации по новым объектам, отображение объектов по классам информации, клас-

сификация объектов. Таким образом, мы можем наблюдать структуру построения отношений между оперативными и системными компонентами.

На рисунке 11 можно наблюдать взаимосвязь отношений между типами оперативных шаблонов и систем-

Рис. 10. Структура отношений программного комплекса ведения обстановки

Рис. 11. Структура отношений программного комплекса ведения и контроля обеспечения боевой и технической готовности, боевой подготовки

ными компонентами программного комплекса. Тем самым можно распределить программный комплекс на системные компоненты и построить систему отношений между оперативными компонентами и системными. Таким образом, можно обеспечить повторное использование одних и тех же системных шаблонов для различных оперативных функций, сократив время на разработку программного комплекса, и обеспечить выполнение необходимых оперативных функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представление структуры модели основывается на достижениях из работ [7–9], которые будем рассматривать в следующей части статьи. Следующие два этапа, которых касается данная статья, это анализ структуры модели и оценка рисков и вероятности успеха разработки. Оба этих этапа тесно связаны с этапами, описанными выше. На основании декомпозиции функций и полученной структуры связей формируются оценочные матрицы. Определенные математические преобразования над данными оценочными матрицами позволяют обосновать и перестроить декомпозицию функций программного обеспечения, а также получить оценку рисков и вероятности успеха разработки.

Таким образом, в первой части статьи предложен подход к разработке сложных систем, в том числе систем двойного назначения. Описаны подходы к разработке программного обеспечения на этапах анализа предметной области и проектирования, позволяющие применить методы иерархической кластеризации при декомпозиции программного обеспечения. С использованием предложенного подхода появляется возможность автоматизации кластеризации компонент программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mil.Press FLOT. URL: <http://www.flot.com> (дата обращения: 28.08.2019).
2. Maritime Domain Awareness: C4I for the 1000 Ship Navy / M. Agnello, J. Astudillo, J. Brown, M. Jauregui, B. Krikorian. Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2009. 256 p.
3. Лаврищева Е.М. Программная инженерия компьютерных систем. Парадигмы, технологии и CASE-средства программирования. К. : Наук. думка, 2013. 283 с.
4. Sage A.P. *Methodology for Large-Scale Systems*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1977. 445 p.
5. Buede D.M. *The Engineering Design of Systems Modeling and Methods*. New York : John Wiley & Sons, 2009. 516 p.

6. Keegan J.G., Kelliher T.P., Oliver D.W. *Engineering Complex Systems with Models and Objects*. New York : McGraw-Hill, 1997. 324 p.

7. Diestel Reinhard. *Graduate Text Mathematics, Graph Theory*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2000. 311 p.

8. Stewart D.V. The Design Structure System – A Method for Managing the Design of Complex Systems // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 1981. Vol. 28/3. pp. 71–74.

9. Математическая модель процесса управления средствами ПВО / Д.А. Григорьев, Т.Н. Масленникова, А.В. Половинкина, А.Н. Пифтанкин // *Автоматизация процессов управления*. 2019. № 2 (56). С. 17–21.

REFERENCES

1. Mil.Press FLOT. Available at: <http://www.flot.com> (accessed 28.08.2019).
2. Agnello M., J. Astudillo, J. Brown, M. Jauregui, B. Krikorian. *Maritime Domain Awareness: C4I for the 1000 Ship Navy*. Monterey, California, Naval Postgraduate School, 2009. 256 p.
3. Lavrishcheva E.M. *Programmnaia inzheneriia kompiuternykh sistem. Paradigmy, tekhnologii i CASE-sredstva programmirovaniia* [Software Engineering of Computer Systems. Paradigms, Technologies and CASE-Tools]. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 2013. 283 p.
4. Sage A.P. *Methodology for Large-Scale Systems*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1977. 445 p.
5. Buede D.M. *The Engineering Design of Systems Modeling and Methods*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2009. 516 p.
6. Keegan J.G., Kelliher T.P., Oliver D.W. *Engineering Complex Systems with Models and Objects*. New York, McGraw-Hill Publ., 1997. 324 p.
7. Diestel Reinhard. *Graduate Text Mathematics, Graph Theory*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2000. 311 p.
8. Stewart D.V. The Design Structure System – A Method for Managing the Design of Complex Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1981, vol. 28/3, pp. 71–74.
9. Grigorev D.A., Maslennikova T.N., Polovinkina A.V., Piftankin A.N. *Matematicheskaya model protsessa upravleniia sredstvami PVO* [The Mathematical Model of Air Defense Control Process]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 2 (56), pp. 17–21.