

Классификация потоков данных комплексов управления и принципы дифференциации на модули элементов таких систем

Л.А. Чижикова

Аннотация – С развитием технологий и новой техники возрастает потребность в создании сложных киберфизических систем. Практическим примером такой системы с бортовым комплексом управления является беспилотный летательный аппарат. При проектировании, разработке и последующих модификациях их программно-алгоритмических и аппаратных комплексов помимо уменьшения пропускной способности каналов бортовой вычислительной сети по мере увеличения функций и режимов работы таких систем существует вероятность регрессии программного кода при неправильной разработке архитектуры. Классификация потоков данных и изначального распределения количества данных в соответствии с функциями позволит облегчить задачи проектирования бортовых комплексов управления, декомпозиции их на модули и архитектуры программного обеспечения таких систем, подобрать оптимальные физические компоненты. В работе проведена классификация потоков данных по сложности бортовых комплексов управления. Классификация бортовых комплексов управления позволяет сократить общее время разработки, спроектировать архитектуру, полноту определения всех связей в системе управления.

Ключевые слова – системы управления, информационный обмен, математическое моделирование, классификация потоков данных

I. ВВЕДЕНИЕ

В существующих реалиях развития технологий и увеличения объема данных первичными аспектами при проектировании и разработке сложных систем должны выступать именно логические, программно-алгоритмические, функциональные аспекты, обработки данных.

Современные бортовые комплексы управления – сложные киберфизические системы. Проектирование их программно-алгоритмических комплексов управления сопряжено как с архитектурными аспектами, так и с распределением вычислительных мощностей между подсистемами. Целью данной работы являлось установление структуры потоков данных и предполагаемого объема пакетов обмена подсистемами бортовых комплексов управления беспилотного ЛА. Актуальность данной работы подтверждается

направлением современных исследований сложных систем реального времени [15, 16, 18], потребностью в унификации и модернизации бортовых комплексов управления беспилотных ЛА. Как отмечает в своей работе [7] в такой специфической отрасли как аэрокосмическая, спутники (являющиеся, по сути, беспилотными) и другие сложные системы становятся все более зависимыми от программного обеспечения. Поэтому немаловажным аспектом при проектировании в том числе программно-алгоритмического обеспечения сложных комплексов управления систем реального времени является разграничение типовых потоков данных от подсистем.

Нагрузку на вычислительные запросы системы и ее подсистем невозможно предсказать только исходя из конструктивных особенностей аппаратной части и их характеристик, а также из функционального назначения прибора. Последующее проектирование архитектуры программно-алгоритмического обеспечения усложняется искусственно накладываемыми ограничениями аппаратной части систем управления. Для корректной интеграции всех модулей системы управления и расчета вычислительных мощностей необходимо знать потоки данных системы управления, которые в свою очередь формируются из функций всей системы. Проектирование в таком случае должно происходить из функциональных задач проектируемой системы. Необходимы новые методы и подходы к проектированию комплекса управления программно-алгоритмического и аппаратного.

II. МЕТОДЫ

Для получения результата классификации потоков данных бортовых комплексов управления были использованы теоретические методы исследования. Экспериментальные данные для анализа потоков данных БПЛА были получены на реальном устройстве. Сравнительный анализ данной работы теоретических расчетов требуемых параметров и их объема данных и реальный объем данных, вырабатываемый источниками – навигационными

датчиками показал вероятность уменьшения объемов потоков информации и критериев выбора конкретных программно-аппаратных решений

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваемые сложные системы посредством программно-алгоритмического обеспечения контролируют и управляют физическими процессами, как правило, с помощью циклов обратной связи, в которых физические процессы влияют на вычисления и наоборот. Вырабатываемые параметры каждым модулем системы не позволяют получить для нее точные формулы, так как при моделировании системы и ее статистической оценки используют, как правило, выражение [17]:

$$p = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi_n \quad (1)$$

Где N – число независимых прогонов модели, φ_n – Фактически при таком подходе вероятность отказа p не соответствует реальным значением, так как в формуле не учтены все аспекты и взаимосвязи модулей системы управления. Примером поиска ошибок в сложных системах также может служить работа [22], при этом, вероятность возникновения ошибки в канале определяется также в уже созданной системе:

$$P_0 = \sum_{j=1}^H P_{0j} P_j \quad (2)$$

Где H = число состояний вероятностного графа потока ошибок, $P_{\phi j}$ – финальные вероятности состояний из уравнений:

$$\sum_{j=1}^H P_{\phi j}, P_{\phi j} \geq 0 \quad (3)$$

$$P_{0j} = \sum_{i=1}^H P_{0j} P_{ij}, j = \overline{1, H} \quad (4)$$

Классическим подходом при создании цифровых систем является алгоритмическое моделирование – конечный автомат, задачный с помощью одношаговой функции перехода, которая определяет алгоритм пересчета состояний автомата. [18]

Предпосылками для данного исследования и последующей классификации стали проблемы сопровождения сложных систем, статистические данные об ошибках в бортовых комплексах управления [2], отсутствие унификации разработки бортовых комплексов управления и затрачивание большого количества времени на такую разработку. Работа по общей классификации систем управления была сделана в [1].

К основным принципам классификации относится деление на группы со схожими признаками. Основной целью классификации является систематизация знаний о различных потоках данных в сложных системах и его подсистем по принципам функционирования. (Поскольку традиционно ЛА классифицировали по летно-техническим характеристикам (ЛТХ) и

массогабаритным характеристикам, также все ЛА и КА можно укрупненно поделить на пилотируемые и автоматические, что непосредственно влияет на создание программно-алгоритмического обеспечения бортовых комплексов управления, количество обрабатываемых данных. Основной целью классификации является описание структуры и взаимоотношений групп сходных объектов. Успешные классификации порождают научные гипотезы, хотя большая часть классификационной работы имеет прикладные, практические цели. Данная статья направлена на классификацию бортовых комплексов управления по уровню сложности и выявления зависимости объема данных и функциональных возможностей таких систем. Потоки данных в сложных системах (к которым относятся бортовых комплексов управления ЛА) вызывают затруднения на этапах реализации: На практике зачастую возникает проблема не просто обработки больших пакетов данных в сложных системах, поступающей от источников информации – подсистем, а задача выбора сообщений и поступающих данных при производительности источников (5) и подсистем б'ольшей, чем пропускная способность канала связи, составляющей (6,8), либо при цикле обработки информации меньшем, чем способность обрабатывать поток данных от подсистем

$$v l x = -(P_x \overline{\ln(P_x)}) \cdot F \quad (5)$$

Пропускная способность всей системы может быть вычислена по формуле :

$$C = y_0 = y(1 - p_n) \quad (6)$$

Где C – пропускная способность системы распределения информации; y_0 – интенсивность обслуженной нагрузки; y – интенсивность поступающей нагрузки; p_n – вероятность потерь по нагрузке (по входному потоку данных)

При этом, пропускная способность каждой линии пучка :

$$\eta = \frac{c}{v} \quad (7)$$

Где v – емкость пучка линий

Пропускная способность одной линии – функциональная зависимость от интенсивности поступающей нагрузки :

$$\eta = f(y) = \frac{y(1-p_n)}{v} \quad (8)$$

Данные методы исследования систем работают на уже разработанных системах и выявляют проблемы передачи данных.

Сроки разработки новых автоматических сложных киберфизических систем слишком велики для текущей конкурентной среды создания таких продуктов

Несмотря на тот факт, что, исторически контроллеры были описаны многими авторами как

системы сбора, обработки информации и управления [5], исследования [6] подчеркивают необходимость количественного исследования роли информации в управлении: в настоящее время не существует общего информационно-теоретического формализма, характеризующего обмен информацией между управляемой системой и контроллером, и, что еще более важно, позволяющего назначать информацию, который позволяет назначить определенное значение информации в процессах управления.

Поскольку исследователи из Политехнического университета Лозанны [7] подчеркивают, что в настоящее время в киберфизических системах архитектура ПО слабо выражена, предлагаемая в данной работе классификация даст возможность построения модульной архитектуры программно-алгоритмического обеспечения с выделением необходимых для этого ресурсов в системе. Следует отметить, что международный стандарт IEEE 1471 также не вносит целостности для разработки архитектуры программно-алгоритмического обеспечения: пять основных его концепций: каждая система имеет архитектуру, но архитектура - это не система; архитектура и описание архитектуры - это не одно и то же; стандарты архитектуры, описания и процессы разработки могут различаться и разрабатываться отдельно; описания архитектуры по своей сути многовидны; и отделение концепции представления объекта от его спецификации является эффективным способом написания стандартов описания архитектуры [8].

Вне зависимости от типов выбранных каналов связи, традиционно все потоки данных разделяют на управляющие и непосредственно потоки данных – измерений, состояний подсистем. С конца 60 годов прошлого века для анализа процессов систем автоматического моделирования конечных автоматов широко используется. Но, как подчеркивает в своей

работе [20], растущие потребности в цифровой обработке сигналов и мультимедийных функциях резко увеличили сложность потока данных в современных встраиваемых системах, что привело к необходимости создания представлений с привязкой к данным и их потокам.

Как можно заключить из рассмотренных источников [16, 19], на сегодняшний день, одним из подходов к распределению данных в динамических дискретных системах [19] является математический объект описания - сети Петри - двудольный ориентированный граф $N = \langle P, T, * \rangle$, где $P = \{p_i\}$, $T = \{t_i\}$ — конечные непустые множества вершин, называемые соответственно позициями (места) и переходами.

Рассматриваемые источники для анализа сложных систем применяют сети Петри, при этом потоки данных делятся на *управляющие и выдающие* данные. При моделировании таких систем предлагается рассматривать трехсторонний граф [20] Подходы к проектированию сложных динамических систем, которыми являются бортовые комплексы управления, на основе сетей Петри неприменимы, поскольку не дают количественной оценки ресурсов создаваемой системы, что подчеркивается в приведенном исследовании [21], так как не учитывают всех критериев: “В силу того, что существующие в рамках данной теории методы анализа не позволяют оценить объем ресурсов, необходимых для построения требуемой модели системы, выделяется проблема нехватки критериев ее оценки с точки зрения сложности построения”. Поэтому целью данной работы является классификация потоков данных сложной системы с целью уточнения критериев проектирования сложных систем.

В общем виде вне зависимости от типа принятия решений принцип функционирования бортовых комплексов управления беспилотных ЛА можно представить как:

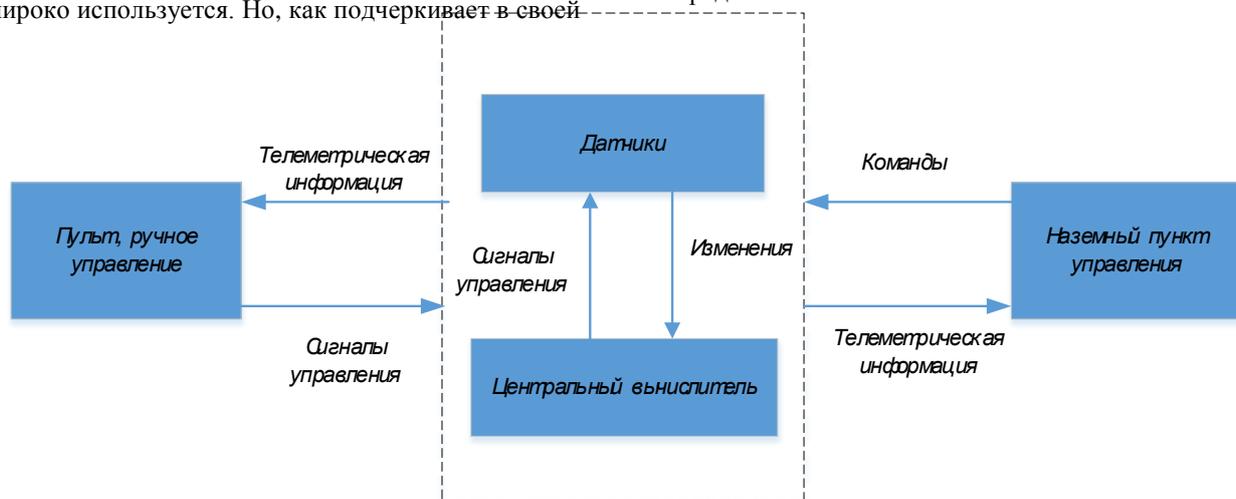


Рис. 1 Функциональная схема сложной системы бортового комплекса управления

В зависимости от принципов функционирования системы управления, определим требуемые типы данных (параметров) для таких функций и их объем.

Классификация по сложности бортовых комплексов управления предполагает кластеризацию по автономности управления и

взаимосвязь с выполняемыми ЛА функциями и режимами. Таксономия бортовых комплексов управления - иерархическая зависимость режимов и функций ЛА от типа рассматриваемой системы с точки зрения принятия решений, представлена на схеме 2.

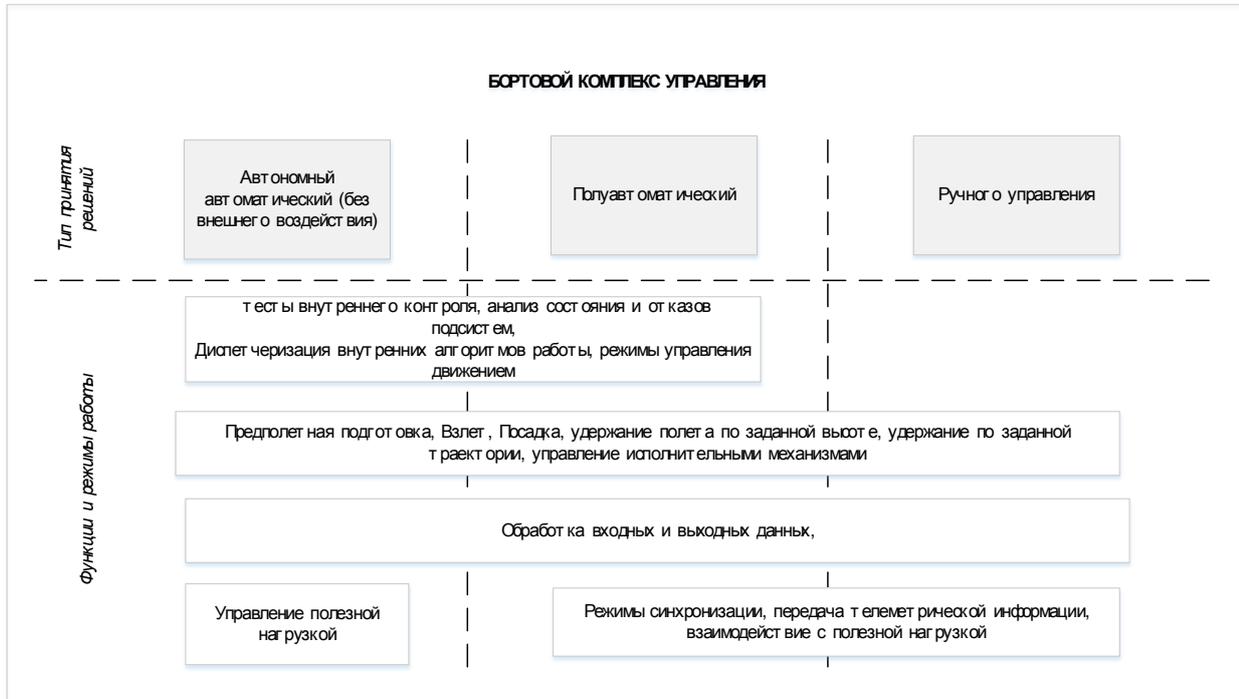


Рис. 2 Типов управления

В настоящее время все бортовые комплексы реализованы на основе цифровых устройств и обработки данных цифровых устройств – двоичных данных. Система автоматического регулирования с

цифровым регулятором, которой является бортовым комплексом управления, имеет функциональную схему в координатах «вход» - «выход»:

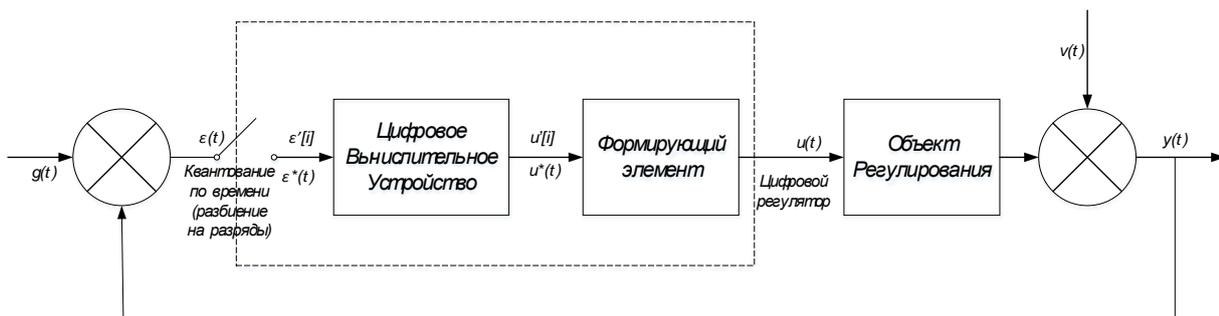


Рис. 3. Синтеза цифровых автоматических регуляторов

При квантовании сигналов по времени определяется требование к частоте обновления информации.

Известно, что все реальные системы являются нелинейными, а линейные системы являются

моделью первого приближения. Тогда, в обобщенном виде, нелинейную САР представим в виде функциональной схемы:

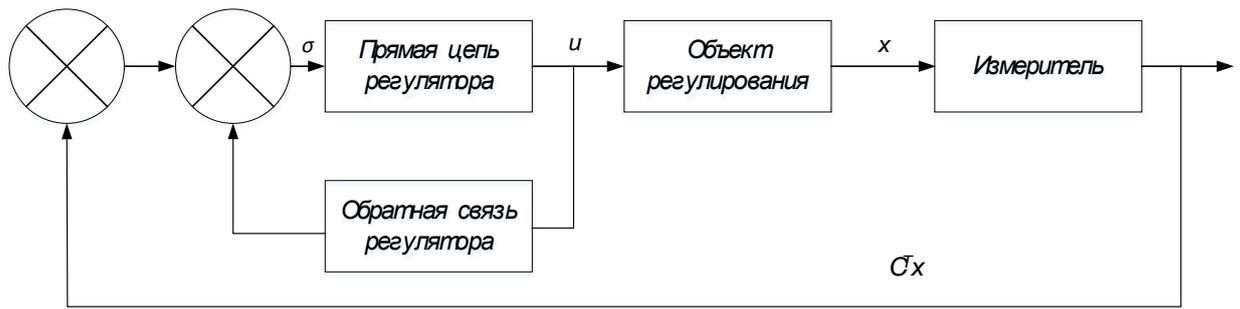


Рис. 4 Функциональная схема системы автоматического регулирования (в обобщенном виде)

В физическом представлении, с точки зрения систем управления для бортовых комплексов управления характерны смешанные структуры оконечных устройств, центральным же органом управления и обработки информации

является центральный вычислитель. В наиболее общем виде такую систему можно представить на основе работы по декомпозиции, определению по принципу функционирования и решаемых задач в следующем виде [9]:

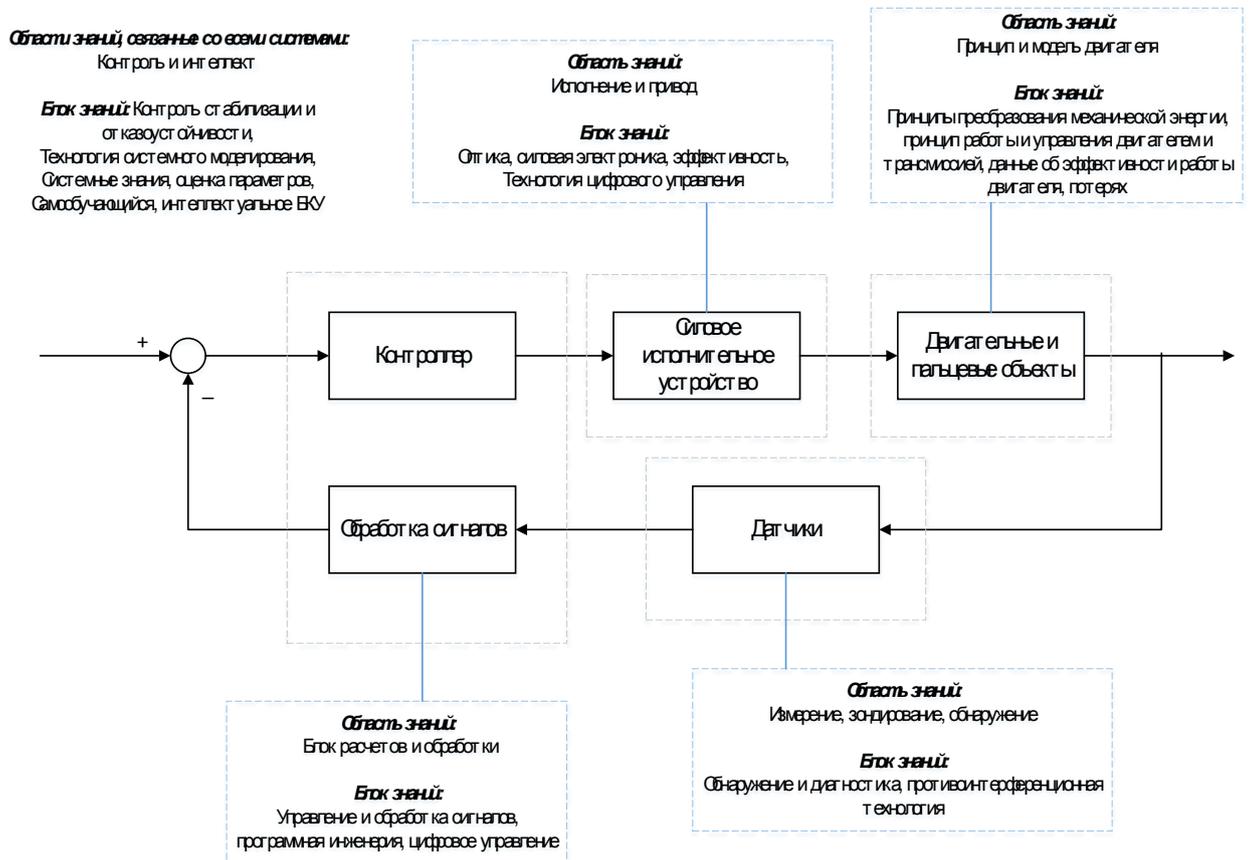


Рис. 5 Физическое представление типового бортового комплекса управления

При подсчете количества информации и обрабатываемых данных в бортовом комплексе управления появление любого сообщения от датчиков равновероятны, приходят в двоичном коде, следовательно, возможна комбинация из t двоичных символов с равной вероятностью. Таким образом, объем данных, требуемых для каждого параметра равен :

$$I = -lb \frac{1}{2^m} = m \text{ bit} \quad (9)$$

Задачей определения количества информации занимались многие исследователи с применением на практике. Классически, авторы характеризуют полное количество информации как оценку частичного совпадения, перекрытия данных двух подсистем [10]

Другие авторы [11] предлагают альтернативную теоретическую меру информации, названную энтропией передачи, которая выражает требуемые свойства полного количества информации, также учитывает динамику потока данных.

Такая энтропия передачи может быть выражена через формулу энтропии Кульбака:

$$T_{J \rightarrow I} = \sum p(i_{n+1}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log \frac{p(i_{n+1} | i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{p(i_{n+1} | i_n^{(k)})} \quad (10)$$

Где k – вектор задержки передачи информации, извлеченный из I :

$$h_I = H_{I(k+1)} - H_{I(k)} \quad (11)$$

Полное количество информации двух процессов I и J с суммарной вероятностью $p_{IJ}(i, j)$ может рассматриваться как избыточный объем кода, созданный из-за ошибочного предположения, что две системы независимы, т.е. принятие $q(i, j) = p_I(i)p_J(j)$ вместо $p_{IJ}(i, j)$. Соответствующая энтропия Кульбака равна

$$M_{IJ} = \sum p(i, j) \log \frac{p(i, j)}{p(i)p(j)} \quad (12)$$

При этом в зависимости от выбранного типа пакета данных значение величины m будет варьироваться. Каждое сообщение несет в себе определенное количество информации. При решении **нашей задачи** нахождения объема данных примем, что появление сообщений от чувствительных элементов-навигационных датчиков на вход главного вычислителя бортового комплекса управления равновероятны. То есть суммарная вероятность появления сообщений равна единице:

$$\sum_{i=1}^m p(x_i) = 1 \quad (13)$$

Тогда энтропия дискретной случайной величины максимальна:

$$P(x_1) = P(x_2) = \dots = P(x_N) = \frac{1}{N} \quad (14)$$

Тогда

$$H(x) = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N \quad (15)$$

Где $\log_2 N$ – мера Хартли и в этом случае статистическая мера Шеннона совпадает с комбинаторной мерой Хартли.

Поскольку объем информации, согласно [12] с вероятностью $p(x_i)$ символов равен:

$$I(x_i) = - \log p(x_i) \quad (16)$$

Если от источника информации поступает информация в двоичном виде, т.е. символ 0 или 1 с равной вероятностью, то объем информации составляет :

$$I(0) = I(1) = lb2 = 1bit \quad (17)$$

где lb – двоичный логарифм, так как при анализе информационных процессов используем логарифм по основанию 2, т.к. исследуемая вычислительная система бортового комплекса ЛА функционирует на основе двоичной системы счисления, а алфавит в двоичной системе $n = 2$

Возвращаясь к классификации бортовых комплексов управления, зависимости функций и режимов и объема данных, обеспечивающих их реализацию, рассмотрим пример **автономной автоматической системы управления** со следующими функциями:

1. Обработка входных и выходных данных от чувствительных элементов-подсистем бортового комплекса управления
2. Предполетная подготовка
3. Управление по заданной высоте
4. Управление исполнительными механизмами

Общий алгоритм работы такой системы представлен на блок-схеме 6.

только с помощью чувствительных элементов – датчиков на борту ЛА.

При заданных ограничениях значений каждого принимаемого параметра определим объем информации для таких функций:

Таблица 1 Объем данных от источников

Наименование параметра	Диапазон значений	Представление max значения в двоичном виде	Объем данных, бит
<i>Данные с измерительных устройств</i>			
Высота	0 – 15000(мм)	11101010011000	16
Количество оборотов сервопривода	0-1000	1111101000	16
Уровень заряда батареи	0-100 (%)	1100100	8
<i>Технологическая информации (данные готовности, исправности,)</i>			
Внутреннее время (счетчик тактов)	0-1000	1111101000	16
Признак повреждения лопастей	-	-	8
Исправность и готовность внутренних подсистем	-	-	8*M (32)
Команды управления исполнительными механизмами	-	-	8*N (16)
<i>Логические данные (признаки перехода на другой режим,)</i>			
Признак обнуления счетчика оборотов сервопривода	-	-	8
Признак обнуления счетчика тактов	-	-	8
Признак достижения минимума по высоте	-	-	8
Параметры для внутренних математических вычислений	-	-	96
Всего			232

Где М – количество физических подсистем, N – количество исполнительных механизмов.

Для реализации таких функций был исследован опытный образец микро БПЛА

погрешность в теоретическом определении объема данных и практической реализацией составлял менее 10%

Согласно отчету [13] данных для реализации тех же функций требуется меньше (136 бит, Таблица 2), что свидетельствует о недостаточном анализе в данной области. Проектируя новые системы на основе данных отчета, впоследствии ресурсов может быть недостаточно для реализации функций и режимов.

Таблица 2 Объем данных согласно отчету [13] по тем же функциям
Table 2 Data capacity with same functions in accordance with the report [13]

Наименование параметра	Объем данных, бит
Команды управления по заданной высоте	24
Тип высоты	8
Отметка о времени измерения	40
Измеренное значение высоты	24
Температуры двигателя	8
Скорость оборотов двигателя	16
Данные о заряде батареи	16
Всего	136

На примере навигационной системы КА, сопряженной с системой управления рассмотрим потоки данных и их соотношения – измеренная, полезная информация и служебная:

Датчик 1 суммарно выдает 240 бит = 30 байт из них значения параметров для вычисления навигации составляют 192 бит = 24 байт.

Доля измеренных значений для расчета навигационных параметров и управляющих воздействий - полезной информации при выбранном канале связи и запаковке данных по таким пакетам составляет:

$$D_z = \frac{192 \cdot 100}{240} \approx 80\% \quad (18)$$

Датчик 2 суммарно выдает 360 бит = 45 байт из них значения параметров для вычисления навигации составляют 192 бит = 24 байт:

$$D_l = \frac{192 \cdot 100}{360} \approx 53\% \quad (19)$$

Датчик 3 суммарно выдает 380 бит = 47,5 байт из них значения параметров для вычисления навигации составляют 256 бит = 32 байта. Доля измеренных параметров - полезной информации для расчета навигационных параметров при выбранном канале связи и запаковке данных по таким пакетам составляет:

$$D_d = \frac{256 \cdot 100}{380} \approx 67\% \quad (20)$$

Тогда вычислим среднее процентное отношение всей полезной информации, поступающей на вход главного вычислителя системы управления:

$$D_{cp} = \frac{D_z + D_l + D_d}{3} \approx 67\% \quad (21)$$

Из расчетов видно, что поток данных от навигационных чувствительных элементов дает 67 % значений параметров для вычисления навигационных данных в бортовом комплексе управления, остальная информация в потоке обрабатывается, является информацией о статусе устройств, технологической либо игнорируется, но занимает вычислительные и временные ресурсы.

На основании анализа получаем численное значение количества информации от реальных источников большим, чем требуется для решения задачи навигации и мониторинга исправности подсистем системы управления, что создает дополнительную нагрузку на такую систему, вероятность отказов возрастает.

Поскольку программная инженерия – довольно молодая наука, то обладает нишами для исследований и единого мнения по проектированию архитектуры ПО нет.

Опираясь на предварительные исследования [14] и распределение по блокам для архитектуры программно-алгоритмического обеспечения, представим наш пример в виде:

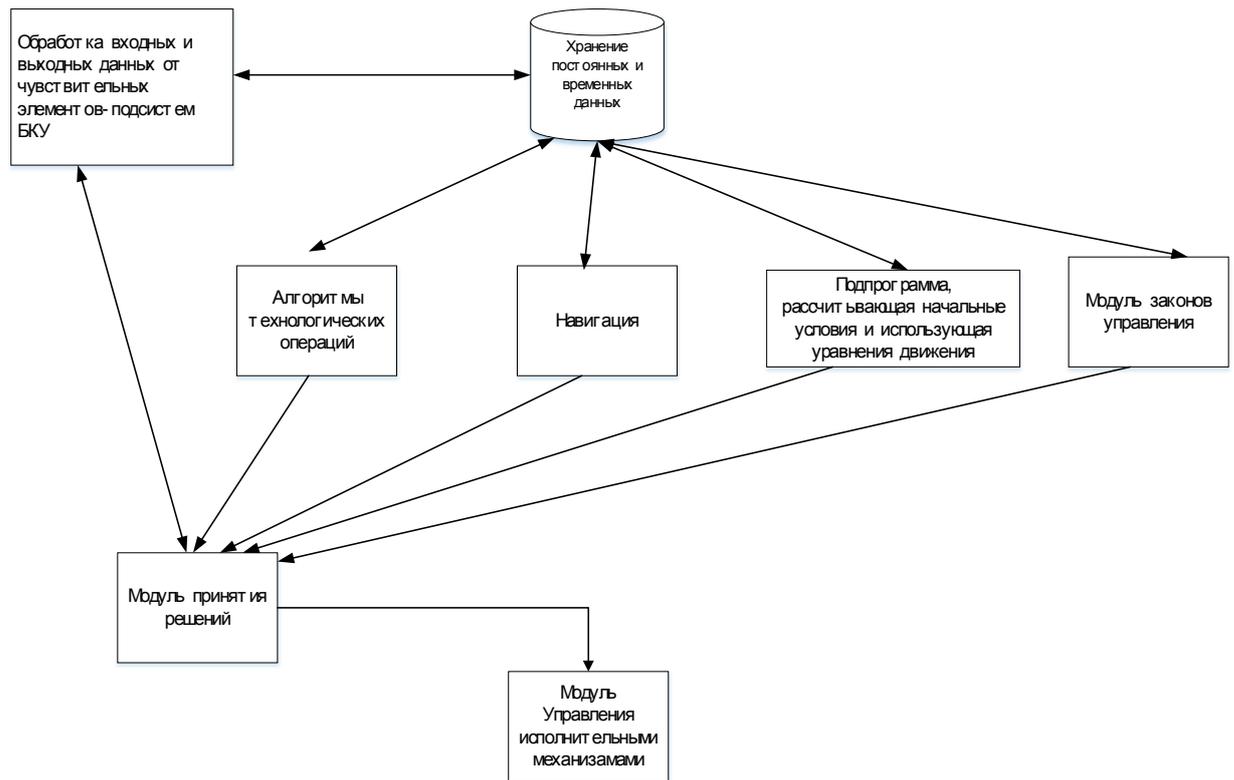


Рис. 7 Архитектура ПО

Стрелками показаны потоки данных

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством анализа теоретических вторичных источников было выявлено, что для проектирования сложных систем сетей Петри неприменимо, поскольку не обладает достаточными критериями для оценки работоспособности всей системы.

Анализ и синтез всех функций ЛА при проектировании бортовых комплексов управления непосредственно выливается в автоматизацию системы управления посредством программно-алгоритмического обеспечения, которое в свою очередь является связующим компонентом всех подсистем и их данных.

Предлагается классифицировать все потоки данных в сложных системах как:

				руются при вычислениях и логических процессах
--	--	--	--	---

Следовательно, следование классификации потоков данных на этапах проектирования и разработки сложных систем, изначальный подсчет количества данных в соответствии с функциями проектируемой системы, позволит облегчить задачи проектирования модулей и архитектуры программного обеспечения, подобрать оптимальные физические компоненты сложных систем. Для полноты определения всех связей в сложных системах, преобразования входных и выходных данных необходимо корректно спроектировать базу данных для логических параметров внутри бортовых комплексов управления, временных измеренных параметров, выдаваемых выходных воздействий, телеметрических данных и прочих типов. Предлагается определить объем потока данных за один вычислительный цикл от измерительных подсистем в процентном соотношении:

Таблица 3 Классификация потоков данных

Управляющие	Потоки данных			
	Параметрические (измеренные значения, вычисленные значения)	Данные о состоянии и работы подсистемы (технологические данные)	Логические данные	Служебные данные канала связи, которые игнорируются

Таблица 4 Процентное отношение объема данных

Измеренные значения	Данные о состоянии	Логические	Служебные
70%*	15%*	10%*	5%*

Данные требуют уточнения на основании статистических исследований сложных систем

Классификация является фундаментальным теоретико-методологическим результатом научной деятельности. Разработанная классификация потоков данных предполагается, что будет опорой эмпирического знания на пути создания

унифицированных комплексов управления, которые будет проще модернизировать и сопровождать. Приведенная классификация потоков данных позволит сократить время на проектирование архитектуры программно-алгоритмического обеспечения, саму разработку, унифицировать существующие подходы.

Экспериментальная часть исследования количества данных беспилотного ЛА была проведена благодаря собственности ООО Лаборатория НПИРА.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Д. А. Новиков, Классификации систем управления, Пробл. управл., 2019, выпуск 4, 27–42 DOI: <https://doi.org/10.25728/pu.2019.4.3>, <http://www.mathnet.ru/links/16fccca22f1fc83f344518c76884f879b/pu1147.pdf> дата обращения 01.07.2021
- [2] Jeff Foust Starliner investigation finds numerous problems in Boeing software development process, February 7, 2020 <https://spacenews.com/starliner-investigation-finds-numerous-problems-in-boeing-software-development-process/> дата обращения 25.03.2021
- [3] О.В. Абрамов К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения Надежность и качество сложных систем №1, 2013;
- [4] В. Н. Рисухин Проблемы, вызванные сложностью систем автоматического управления полетом и возможные пути их преодоления "Вестник" Международной академии проблем Человека в авиации и космонавтике 2006 http://xn----7sbhmbqodqf0asnf.xn--plai/frames/archive/2_2006.pdf#page=24 дата обращения 09.04.2021
- [5] H.L. Weidemann, in C. Leonodes (ed.), *Advances in Control Systems*, vol. 7 (Academic Press, New York, 1969)
- [6] Touchette, H. and S. Lloyd. "Information-theoretic approach to the study of control systems." *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications* 331 (2004): 140-172
- [7] A. Mavridou, E. Stachtari, S.Bludze, A. Ivanov, P. Katsaros, J. Sifakis Architecture-based Design: A Satellite On-Board Software Case Study EPFL IC IIF RiSD Technical Report EPFL-REPORT-221156 Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2016
- [8] M. W. Maier, D. Emery and R. Hilliard, "Software architecture: introducing IEEE Standard 1471," in *Computer*, vol. 34, no. 4, pp. 107-109, April 2001, doi: 10.1109/2.917550.
- [9] Ян Кенг, Луо Ингли Системы управления двигателем и движением Издательство Университета Цинхуа, 2014
- [10] С.Е. Shannon, W.Weaver, "The Mathematical Theory of Information», University of Illinois Press, Urbana, 1949
- [11] T.Shreiber Measuring Information Transfer Max Plank Institute for Physics of Complex Systems, Germany, 2008
- [12] Xuehong Cao, Zongcheng Zhang, *Information Theory and Coding*, Tsinghua University Press Co., Ltd., 2004-Теория кодирования-233 страницы
- [13] Report ITU-R M.2171 (12/2009) Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace
- [14] Л. А. Чижикова Принципы проектирования модульной архитектуры программного обеспечения авиационной тематики // Программные продукты и системы. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-proektirovaniya-modulnoy-arhitektury-programmnogo-obespecheniya-aviatsionnoy-tematiki> (дата обращения: 08.07.2021).
- [15] M. Najja, S. Ben Ahmed and J. -M. Bruel, "New schedulability analysis for real-time systems based on MDE and Petri Nets model at early design stages," 2015 10th International Joint Conference on Software Technologies (ICSOFT), 2015, pp. 1-9.
- [16] Yang, N., Yu, H., Sun, H., & Qian, Z. (2011). Scheduling Real-Time Embedded Systems Based on TCPNIA. *J. Softw.*, 6, 340-348
- [17] Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов под общей ред. С.В. Емельянова М.: Машиностроение, Берлин: Техник, 1988, 520 с.Технология системного моделирования
- [18] Xiang, D., Liu, G., Yan, C., & Jiang, C. (2018). Detecting data-flow errors based on Petri nets with data operations. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5, 251-260
- [19] П. В. Марков, Групповая классификация дискретных динамических систем, Нелинейная динам., 2013, том 9, номер 4, 641–650
- [20] Mauricio Varea Bashir M. Al-Hashimi University of Southampton and Luis A. Cortes, Petru Eles, and Zebo Peng Linköping University Dual Flow Nets: Modeling the Control/Data-Flow Relation in Embedded Systems
- [21] Пашенко Дмитрий Владимирович, Трокоз Дмитрий Анатольевич, Советкина Галина Ивановна, Николаева Екатерина Андреевна Методика многокритериальной оценки аппарата сетей Петри // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. №1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-mnogokriterialnoy-otsenki-apparata-setey-petri> (дата обращения: 19.04.2022)
- [22] Шелухин, О. И. Разработка марковской модели потока ошибок в информационных системах при воздействии помех импульсного типа / О. И. Шелухин, М. В. Арсеньев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 28-31. – EDN IJVLTV

Чижикова Л.А. ведущий инженер-программист, <https://orcid.org/0000-0003-1331-970X>

¹АО НПО Лавочкина, ул.Ленинградская, д.24, Московская область, г.Химки, 141402, РФ;

²ООО Лаборатория НПИРА, Москва

Classification of the data flows of control complexes and principles of differentiation into modules of elements of such systems

Liudmila Chizhikova

Abstract - With the development of technology and new techniques, the need for complex cyber-physical systems is increasing. Practical example of such system with onboard control complex is unmanned aerial vehicles. When designing, developing and subsequent modifications of their software-algorithmic and hardware complexes, in addition to reducing the bandwidth of on-board computing network channels as functions and modes of operation of such systems increase, there is a possibility of regression of program code if the architecture is not properly designed. Classification of data flows and initial distribution of the amount of data according to the functions will facilitate the tasks of designing on-board control complexes, decomposition into modules and software architecture of such systems, to choose the optimal physical components. The paper classifies data flows according to the complexity of on-board control complexes. Classification of on-board control complexes allows to reduce total development time, design architecture, completeness of definition of all connections in the control system.

Key words: control systems, data science, software architecture, system analysis

REFERENCES

- [1] D. A. Novikov, Classification of Control Systems, Management Problems, 2019, Issue 4, 27-42 DOI: <https://doi.org/10.25728/pu.2019.4.3>, <http://www.mathnet.ru/links/16fcca22f1fc83f344518c76884f879b/pu1147.pdf> accessed 01.07.2021
- [2] Jeff Foust Starliner investigation finds numerous problems in Boeing software development process, February 7, 2020 <https://spacenews.com/starliner-investigation-finds-numerous-problems-in-boeing-software-development-process/> access date 25.03.2021
- [3] O.V. Abramov To the problem of preventing accidents of technical objects of responsible purpose Reliability and quality of complex systems No.1, 2013;
- [4] V. N. Risikhin Problems caused by complexity of automatic flight control systems and possible ways to overcome them Vestnik of International Academy of Human Problems in Aviation and Cosmonautics 2006 http://xn---7sbhmbqodqf0asnfxn--p1ai/frames/archive/2_2006.pdf#page=24 circulation date 09.04.2021
- [5] H.L. Weidemann, in C. Leonodes (ed.), Advances in Control Systems, vol. 7 (Academic Press, New York, 1969).
- [6] Touchette, H. and S. Lloyd. "Information-theoretic approach to the study of control systems." *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications* 331 (2004): 140-172
- [7] A. Mavridou, E. Stachtari, S. Bliudze, A. Ivanov, P. Katsaros, J. Sifakis Architecture-based Design: A Satellite On-Board Software Case Study EPFL IC IIF RiSD Technical Report EPFL-REPORT-221156 Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2016
- [8] M. W. Maier, D. Emery, and R. Hilliard, "Software architecture: introducing IEEE Standard 1471," in *Computer*, vol. 34, no. 4, pp. 107-109, April 2001, doi: 10.1109/2.917550.
- [9] Yang Keng, Luo Yingli Engine and Motion Control Systems Tsinghua University Press, 2014
- [10] C.E. Shannon, W.Weaver, "The Mathematical Theory of Information," University of Illinois Press, Urbana, 1949
- [11] T. Shreiber Measuring Information Transfer Max Plank Institute for Physics of Complex Systems, Germany, 2008
- [12] Xuehong Cao, Zongcheng Zhang, Information Theory and Coding, Tsinghua University Press Co.
- [13] Report ITU-R M.2171 (12/2009) Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace
- [14] L. A. Chizhikova Principles of designing a modular architecture of aviation software // *Software Products and Systems*. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiy-proektirovaniya-modulnoy-arhitektury-programnogo-obespecheniya-aviatsionnoy-tematiki> (access date: 08.07.2021).
- [15] M. Naija, S. Ben Ahmed and J. -M. Bruel, "New schedulability analysis for real-time systems based on MDE and Petri Nets model at early design stages," 2015 10th International Joint Conference on Software Technologies (ICSOFT), 2015, pp. 1-9.
- [16] Yang, N., Yu, H., Sun, H., & Qian, Z. (2011). Scheduling Real-Time Embedded Systems Based on TCPNIA. *J. Softw.*, 6, 340-348
- [17] E.F. Avramchuk, A.A. Vavilov, S.V. Emel'janov pod obshej red. S.V. Emel'janova M.: Mashinostroenie, Berlin: Tehnik , 1988 , 520 s.Tehnologija sistemnogo modelirovaniya
- [18] Xiang, D., Liu, G., Yan, C., & Jiang, C. (2018). Detecting data-flow errors based on Petri nets with data operations. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5, 251-260
- [19] P. V. Markov, Gruppovaja klassifikacija diskretnyh dinamicheskikh sistem, Nelinejnaja dinam., 2013, tom 9, nomer 4, 641-650
- [20] Mauricio Varea Bashir M. Al-Hashimi University of Southampton and Luis A. Cortes, Petru Eles, and Zebo Peng Linköping University Dual Flow Nets: Modeling the Control/Data-Flow Relation in Embedded Systems
- [21] Pashhenko Dmitrij Vladimirovich, Trokoz Dmitrij Anatol'evich, Sovetkina Galina Ivanovna, Nikolaeva Ekaterina Andreevna Metodika mnogokriterial'noj ocenki apparata setej Petri // *Izvestija vuzov. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*. 2017. №1 (41). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-mnogokriterialnoy-otsenki-apparata-setey-petri> (data obrashhenija: 19.04.2022)
- [22] Sheluhin, O. I. Razrabotka markovskoj modeli potoka oshibok v informacionnyh sistemah pri vozdejstvii pomeh impul'snogo tipa / O. I. Sheluhin, M. V. Arsen'ev // *Jelektrotehnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy*. – 2006. – T. 2. – № 1. – S. 28-31. – EDN IJVLTV