

УДК303.732

DOI:10.47813/dnit-nto.2021.79-87

Исследование зависимости функций, режимов ЛА и математическое моделирование потоков данных БКУ

Л.А. Чижикова

ООО Лаборатория НПИРА, МАИ, Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125310, Россия

* E-mail: ludmilachizhikova@yahoo.com

Аннотация. Данная работа посвящена математическому определению объема данных, требуемых для реализации функций автоматического беспилотного ЛА. Проведено сравнение характеристик исследуемой практической реализации ЛА с заявленными функциями. Рассчитан процент объема обмена технологическими данными и запаса вычислителя для реализации функций автоматического управления. Работа носит практический характер введения новой методологии, этапов проектирования ЛА для сокращения последующих доработок.

Ключевые слова: системы управления, данные, математическое моделирование, системный анализ

The study of flight machine functions, modes dependencies and mathematical modeling of onboard control systems data flows

L.A. Chizhikova

LLC Laboratory SARDA, Moscow Aviation Institute, Volokolamskoye shosse, 4, 125310, Moscow, Russia

* E-mail: ludmilachizhikova@yahoo.com

Abstract. This work is devoted to mathematical determination of the amount of data required to implement the functions of an automatic unmanned aircraft. A comparison of the characteristics of the investigated practical implementation of the aircraft with the declared functions was carried out. We calculate the percentage of the volume of technological data exchange and the calculator's reserve for the realization of automatic control functions. The work has the practical nature of introducing a new methodology, the stages of aircraft design to reduce subsequent revisions.

Key words: control systems, data, mathematical modeling, system analysis

1. Введение

Согласно теоретическому анализу, возрастающая потребность в создании беспилотной авиационной техники, спутников, малых космических аппаратов накладывает отпечаток на принципы разработки такой техники. Разработка такой техники требует сокращения сроков проектирования и изготовления, а также затрат. Программно-алгоритмическое обеспечение для автоматического управления играет ключевую роль при создании БПЛА и КА.

Данное исследование является мультидисциплинарным, затрагивает такие области знаний как теория информации, системный анализ, механику полета, теорию автоматического управления. Целью данной работы является апробация и создание математического аппарата оптимизации потоков данных БКУ ЛА.

Данная работа на пути формирования полной методики синтеза БКУ рассматривает теоретические аспекты и математическое моделирование объема информации динамической системы управления и взаимодействия с датчиками на примере простейшего автоматического беспилотного ЛА вертикального взлета с минимальным набором функций. Также в данной работе проведен практический эксперимент на прототипе микро - БПЛА, его аппаратно-программном обеспечении и дополнении функции передачи информации на землю в соответствии с расчетными показателями вероятности корректной обработки такого объема информации.

Анализируя статистику [1, 2], можно сделать вывод, что именно из-за программно-алгоритмического обеспечения было потеряно время на разработку и доработку комплексов КА и ЛА.

2. Теоретическая часть

Ранее опубликованные работы и исследования по обработке данных в основном выявили особенности подходов обработки данных посредством исследования пропускной способности каналов с помощью экспоненциальной матричной корреляционной модели [3].

Обоснование проведение математического моделирования и поиска оптимального объема информации, циркулирующей в БКУ обусловлена усложнением проектируемых комплексов, увеличением программно-алгоритмических модулей и сложностью найти ошибки в таких комплексах [4].

Работ, посвященных предикатному расчету оптимального объема информацией подсистем БКУ с целью повышения надежности работы САУ ЛА найдено не было.

В данной работе в первую очередь определим функции и режимы автоматического ЛА, параметрическую информацию, данные для САУ.

На примере регулирования по высоте БПЛА используем ПИД-регулятор, настроенный по правилам Циглера-Николса, который на линейной модели квадрокоптера может быть осуществлен путем использования элементов линеаризации обратной связи по параметрам, действующим на положение квадрокоптера. Преимуществами ПИД-регулятора является его простая структура управления и легкость реализации. ПИД-регулятор рассматривает значение "ошибки" как разницу между измеряемой переменной и желаемым заданным значением, в рассматриваемом случае при высоте меньшей 20 см от поверхности, высота должна увеличиваться, число оборотов сервопривода, соответственно, должно также увеличиваться. Уравнение ПИД-регулятора имеет вид:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) dr + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

$$e(t) = X_d(t) - X(t) \quad (2)$$

В которой $U(t)$ - выходной сигнал управления, $e(t)$ - разница между желаемым состоянием $X_d(t)$ и фактическим состоянием $X(t)$, а K_p , K_i , K_d - пропорциональный, интегральный и производный коэффициенты усиления, соответственно. Изменение углов тангажа и крена может происходить на основе крутящего момента, создаваемого роторами на осях X или Y рамы корпуса. В данном моделировании было достаточно просто управлять параметрами управления K_p и K_d (P и D управление), так как K_i использовался для уменьшения конечной ошибки системы и, следовательно, не нужен

Состояние систем, для которых известны начальные состояния и входные воздействия известны, может быть описано следующим уравнением [5]:

$$x(t) = f[t, t_0, x(t_0), \xi(t_0, t)] \quad (3)$$

где $x(t)$ - набор значений вектора состояния, который описывает область возможных состояний системы;

$\xi(\dots)$ - функция, описывающая характер входного воздействий, в зависимости от типа решаемой задачи.

Ранее автором работы был проведен анализ и систематизация знаний по принципам проектирования модульной архитектуры ПО БКУ [6]. Данный метод может быть применен к любым БКУ. Построение предложенной матрицы размером $(M - 1) \times N$ числа необходимых программных модулей может быть построена, исходя

из функционального наполнения БКУ, но не решает проблему информационного наполнения и оценки оптимального объема данных БКУ.

В рассматриваемых случаях теоретического анализа и практического исследования малого беспилотного ЛА принимаем, что все потоки данных – двоичная информация, обрабатываемая микропроцессором также в двоичном виде.

Для достаточного определения объема и потоков данных в БКУ для удовлетворения всех функций движения и телеметрии ЛА следует определить все режимы работы и состояний системы – определить последовательность

$$\{\mathbf{u}_i\}, i = \overline{1, N}, \mathbf{u}_i \in U_i \quad (4)$$

которая обеспечивает перевод системы, описываемой уравнением

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i, \xi_i) \quad i = \overline{1, N} \quad (5)$$

где $\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i$ – векторы состояния и управления соответственно, ξ_i – вектор возмущения в момент времени, \mathbf{f}_i – вектор – функция N - количество шагов (временных) управления) из начального состояния \mathbf{x}_1 в конечное \mathbf{x}_{N+1} с минимальным значением математического ожидания функции конечного состояния.

Согласно [7] среднее число бит, необходимых для кодирования одного дополнительного состояния системы, если все предыдущие состояния системы известны, можно вычислить по формуле:

$$h_i = -\sum p(i_{n+1}, i_n^{(k)}) \log p(i_{n+1} | i_n^{(k)}) \quad (6)$$

Определим количество информации в сообщении от датчиков, где вся информация в потоке данных состоит из m двоичных символов, тогда количество информации (объем данных) вычислим по формуле:

$$I(x) = -m \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i(x_i) \quad (7)$$

Объем информации, согласно [8] с вероятностью $p(x_i)$ символов равен:

$$I(x_i) = -\log p(x_i) \quad (8)$$

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

$$I(0) = I(1) = \text{lb}2 = 1\text{bit}, \quad (9)$$

где lb – двоичный логарифм, так как при анализе информационных процессов используем логарифм по основанию 2, т.к. исследуемая вычислительная система БКУ

ЛА функционирует на основе двоичной системы счисления, а алфавит в двоичной системе $n = 2$.

То есть независимо от поступления 0 или 1 объем такой информации составляет 1 бит. Тогда, если двоичное число из m битов поступает на вход другого устройства, то каждый бит передается с вероятностью от 0,1 до 2. Возьмем любое число, т.к. возможна комбинация 2^m с равной вероятностью. Таким образом, количество информации для каждого символа равно:

$$I = -\lg \frac{1}{2^m} = m \text{ бит} \quad (10)$$

Следовательно, определив основные функции управления теоретически (5,6,10) определим данные для обработки такой информации. Также определим граничные значения возможных параметров с целью дальнейшей оптимизации на заданном диапазоне. Рассматриваемый БПЛА адаптивного управления, управляется только от изменения параметра высоты, следовательно измеряемыми параметрами и данные для обработки в САУ будут:

Таблица 1. Минимальный набор параметров и его количество информации.

Наименование параметра	Количество информации
Высота измеренная	32 бита
Количество оборотов сервопривода	32 бита
Технологическая информация	64 бита
Всего	128 бит

Согласно теоретическому анализу, в автоматическом режиме данных для обработки требуется меньше, исследуя данные отчета [9] установим соотношение значений измеренных параметров и технологической информации в автоматическом режиме по заданной высоте. Требуется следующий объем информации (крейсерский режим):

Таблица 2. Объем данных для автоматического режима СУ ЛА.

Наименование параметра	Тип данных	Кол-во бит	Частота обновления информации (Гц)	Частота обновления данных (бит/сек)
Команды управления по заданной высоте	(long int)	24	1	24
Тип высоты	Unsigned char	8	1	8

Отметка о времени измерения		40	1	40
Измеренное значение высоты	Long int	24	1	24
Температура двигателя	Unsigned char	8	1	8
Скорость оборотов двигателя	Unsigned int	16	1	16
Данные о заряде батареи	Unsigned int	16	1	16
Всего		136		136

Согласно [9] максимальные требования к обработке пакетов данных для управления БПЛА категории мини (до 5 кг) равны 1862 бит/сек.

Для достаточного определения объема и потоков данных в БКУ для удовлетворения всех функций движения и телеметрии ЛА следует определить все режимы и состояния системы.

3. Практическая часть

Рассмотрим практическую реализацию БПЛА вертикального взлета с автоматическим управлением без информационного обмена с каким-либо пультом управления и наземным пунктом управления. Такой БПЛА имеет следующие функциональные возможности и режимы работы, анализ работы микропроцессора показал примерный объем данных БКУ:

Таблица 3. Соотношение параметров и объема данных практических исследований микро БПЛА.

Режим работы	Функции	Кол-во бит
Предполетная подготовка	Выработка технологических параметров	16
	Статус работы двигателя	8
	Статус работы датчиков	8
	Начальные измеренные значения датчиков	32
Общее количество данных		64
Полет в режиме зависания	Измерения с датчиков	32
	Признак повреждения лопастей	8
	Технологическая информация	8
Общее количество данных		48

Следовательно, для каждого режима технологическая информация от общего объема данных составляет 50% и 33% соответственно:

$$x_1 = \frac{32 \cdot 100\%}{64} = 50\%; \quad x_2 = \frac{16 \cdot 100\%}{48} \approx 33\% ()$$

Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) исследуемого БПЛА состоит из:

- Микропроцессор.
- Шаговый двигатель (мотор-редуктор, необходимый для соосного движения).
- Излучающий диод ИК-диапазона.
- ИК-приемник 38кГц.
- Батарея питания 3,7В.
- Цифровая коробка передач (трансмиссия).

Датчики БРЭО исследуемого БПЛА на печатной плате состоят из зарядного устройства USB для литиевой батареи от Linear Technology компании Analog Devices, N-канального МОП-транзистора от Siliconix и инфракрасного приемника, который обнаруживает отражения от поверхностей от инфракрасного светодиода, направленного вниз. Инфракрасный светодиод (излучающий диод ИК-диапазона) и инфракрасный приемник вместе образуют датчик приближения, который подает сигнал на программу управления двигателем, чтобы увеличить подъемную силу, а, значит и обороты винтов, поскольку БПЛА находится слишком близко к земле. Принцип управления по высоте от ИК-датчика основан на следующем:

- Модуль ИК-датчика принимает ИК-импульсы и преобразует их в соответствующие электрические импульсы, которые подаются на микроконтроллер. Микроконтроллер декодирует в соответствующий байт данных сигналы с ИК-приемника. Эти байты данных используются для принятия дальнейших решений по управлению. Управляющие выходные сигналы подаются на драйвера шагового двигателя, количество оборотов которого увеличивается, если значение высоты с ИК-датчика равно менее 0,2 м или остаются прежними.

4. Результаты

Вычислим предполагаемый процент объема технологической информации от общего объема данных.

При теоретическом анализе и приближенных вычислениях технологическая информация составила 50% от общего объема информации:

$$x = \frac{100\% \cdot 64}{128} \approx 50\%$$

При теоретическом анализе [9] технологическая информация составила 52,94% от общего количества информации:

$$x = \frac{100\% \cdot 72}{136} \approx 52,94\%$$

Очевидно, что при детальной структуризации информации и определении числа функций и режимов работы системы можно вычислить более точный объем данных, требуемых для реализации запланированных функциональных возможностей бортового комплекса управления.

5. Выводы. Заключение

Связь и обмен данными на борту являются ключевыми факторами в системах беспилотной авиации и КА, а также обеспечения безопасности полетов и разделения воздушного пространства. Выбор и расчет оптимального объема информации уже на этапе проектирования ЛА обоснован отсутствием человека на борту, который не может повлиять на процесс управления таких ЛА.

Расчетный теоретический анализ и сравнение с практической реализацией ЛА с заданными функциями показывает, что при увеличении функциональных возможностей обработка информации станет невозможной без сбоев.

Анализ показывает необходимость предварительных расчетов оптимального объема информации на этапе проектирования ЛА и трансформации действующих методов и методологий разработки ЛА, направленных прежде всего на удовлетворение массогабаритных характеристик.

Но при проектировании БКУ следует учитывать, что потоки данных измерений должны быть 50 % от общего потока данных, при этом объем статусов систем и технологической информации должен составлять не более 50 % от общего объема информации. Такое соотношение принято во избежание дальнейших ошибок в управлении и обработке информации БКУ.

Данная работа помимо технологической информации не учитывает возможных логических параметров и преобразования данных, которые в реальности нередко

присутствуют, что накладывает отпечаток на быстрдействие систем управления и обработки информации. Практическая реализация и исследования показали отклонения от теоретической закономерности отношения объема технологических данных (33%) в нормальном режиме. Данная проблема будет исследована в дальнейшей работе.

Список литературы

1. История «Лунохода-1» и работа над ошибками: РКС публикует документ 1972 года с анализом миссии. <http://russianspacesystems.ru/2019/04/12/istoriya-lunokhoda-1>. (дата обращения 15.05.2021).
2. Jeff Foust Starliner investigation finds numerous problems in Boeing software development process, SpaceNews. 2020. <https://spacenews.com/starliner-investigation-finds-numerous-problems-in-boeing-software-development-process>. (дата обращения 01.05.2021).
3. Loyka, S.L. "Channel capacity of MIMO architecture using the exponential correlation matrix / S. L. Loyka // In IEEE Communications Letters. – 2001. – № 5(9). – С. 369-371. doi: 10.1109/4234.951380.
4. Додонов, А.Р. Принципы организации бортовых вычислительных комплексов автоматических космических аппаратов / А. Р. Додонов // Достижения науки и образования. – 2018. – №8(30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiyu-organizatsii-bortovyh-vychislitelnyh-kompleksov-avtomaticheskikh-kosmicheskikh-apparatov>. (дата обращения: 21.06.2021).
5. Stepanov, V.Y. Mathematical modelling of the unmanned aerial vehicle dynamics / V. Y. Stepanov // Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mathematical-modelling-of-the-unmanned-aerial-vehicle-dynamics>. (дата обращения: 27.05.2021).
6. Чижикова, Л.А. Принципы проектирования модульной архитектуры программного обеспечения авиационной тематики / Л.А. Чижикова // Программные продукты и системы. – 2017. – № 2. – С. 291-300.
7. Schreiber, T. Measuring Information Transfer / T. Schreiber // Phys. Rev. Lett. – 2000. – № 85(461).
8. Cao Xuehong. Information Theory and Coding / Cao Xuehong, Zhang Zongcheng // Tsinghua University Press Co., Ltd. – 2004. – С.
9. Series, M. Report ITU-R M.2171 Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace / M. Series // Mobile, radiodetermination, amateur and related satellites services. – 2009.