

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ БОРТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Г.А. Платошин

Государственный научный центр ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГНЦ ФГУП ГосНИИАС)
Россия, 125167, Москва, ул. Викторенко, 7
E-mail: gaplatoshin@2100.gosniias.ru

Н.И. Сельвесюк

Государственный научный центр ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГНЦ ФГУП ГосНИИАС)
Россия, 125167, Москва, ул. Викторенко, 7
E-mail: nis@gosniias.ru

М.Е. Семёнов

Воронежский государственный университет (ВГУ)
Россия, 394036, Воронеж, Университетская пл., 1
E-mail: mk1150@mail.ru

Ключевые слова: авиационный комплекс, архитектура информационно вычислительной сети, уровни проектирования сети, критерии оценки архитектуры сети, математическая оптимизация.

Аннотация: Рассмотрены математически аппарат для оптимизации бортовой информационно-вычислительной сети. Определены основные параметры, необходимые для оценки и сравнения современных бортовых сетевых архитектур.

1. Введение

Авионика прошла в своем развитии достаточно длительный путь – от отдельных приборов и устройств, обеспечивающих решение некоторых автономных задач обеспечения полета воздушных судов до современных сложных аппаратно-программных сетевых комплексов с развитой архитектурой, позволяющих решать реальные задачи комплексного автоматизированного управления полетом.

При проектировании современных комплексов авионики используют принцип Распределенной модульной электроники (РМЭ), который предполагает, что стандартизированные компоненты систем авионики размещаются в определенных точках воздушного судна, что обусловлено желанием минимизировать коммуникационные линии, а также время отклика устройств. Для реализации концепции РМЭ создаются аппаратные компоненты нового типа, которые обеспечивают локальное управление вводом-выводом данных. Данные, предоставляемые датчиками и исполнительными механизмами, локально собираются устройствами ввода-вывода и передаются по сети AFDX

[1] в централизованные вычислительные модули, поскольку периферийные устройства, как правило, обладают ограниченными вычислительными возможностями. Количество устройств, которые ведут обмен данными достигает нескольких сотен. Результатом проектирования РМЭ является большое количество возможных вариантов архитектуры. Вместе с тем важно соблюдать различные ограничения по ресурсам, безопасности, отказоустойчивости и многим другим при этом следует учитывать противоречивость некоторых критериев [2]. Дополнительная сложность связана с естественным требованием к локализации программных приложений. Указанная локализация реализуется посредством операционной системы реального времени (ОСРВ). Каждое приложение выполняется в собственной программной среде, на виртуальном устройстве. В настоящее время не существует однозначного решения задачи оптимального проектирования архитектуры РМЭ [1]. Поскольку архитектура, вместе с авионикой составляют порядка 30% от общей стоимости самолета, цена ошибки допускаемой при проектировании архитектуры чрезвычайно велика. Зачастую архитектура неудовлетворяющая критериям оптимальности (как с точки зрения распределения информационных ресурсов, так и распределения вычислительных средств), не в полной мере отвечает заданным требованиям, что в свою очередь очевидным образом сказывается на функционировании основных, жизненно важных систем летательного аппарата. Устранение подобных проблем – дорогостоящий процесс, что в свою очередь делает воздушное судно еще более дорогим и менее конкурентоспособным [3].

2. Алгоритмическое обеспечение оптимизации систем авионики

Существующие подходы к решению задачи оптимального проектирования авионики связаны с эвристическими подходами - генетический алгоритм, алгоритм имитации отжига, алгоритм муравьиной колонии и др. Однако эти подходы, не в полной мере отвечают поставленной задаче. В частности, они не гарантируют нахождение лучшего решения (даже если оно заведомо существует), может быть получено заведомо неоптимальное решение и некоторые другие. В связи с этим предоставляется целесообразным в качестве основного метода оптимизации выбрать методологию целочисленного программирования, что обусловлено возможностью получения оптимального решения, исключением вероятности непредсказуемого поведения (путем полного перебора вариантов), большим количеством готовых, стандартных программных продуктов, для которых необходимо изменить постановку задачи, универсальностью ПО (решаемая задача описывается отдельно от алгоритма решения).

Целочисленное программирование – это дискретный аналог линейного программирования (ЛП), в рамках которого требуется минимизировать линейную функцию, при выполнении набора линейных ограничений, на фазовые переменные, с дополнительным требованием целочисленности соответствующего решения.

Если дополнительно потребовать чтобы фазовые координаты принимали лишь два значения 0 и 1, то получается задача бинарного программирования.

3. Критерии оптимизации систем авионики

Архитектура систем авионики должна гарантированно удовлетворять многим требованиям. Эти требования с одной стороны обусловлены широким спектром решаемых задач, с другой стороны конструктивными особенностями летательных аппаратом. Она должна предоставлять достаточный объем ресурсов и производительности для выполнения всех функций, иметь требуемый уровень безопасности и надежности и соответствовать структуре воздушного судна.

Основными параметрами, оптимизируемыми в ходе разработки архитектуры являются: гарантия доставки и время доставки сообщений, количество ресурсов, масса архитектуры, стоимость архитектуры, ограничение по энергопотреблению, пространство необходимое системе авионики на воздушном судне (максимальный объем ограничен), надежность и резервирование [4].

4. Реализация принципов бинарного программирования на примере присваивания устройств

Для примера, рассмотрим задачу связанную с оптимизацией процесса присваивания устройств. Эта задача связана с размещением устройств по заранее выбранным местам. Формализация указанной задачи основана на методе бинарного программирования. Для решения обозначенной задачи схема размещения устройств в местах установки представляется в виде бинарного вектора.

$$x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{|\mathcal{D}|}),$$

$$\begin{matrix} \mathcal{D}_1 \mathcal{D}_2 \mathcal{D}_1 \mathcal{D}_2 \dots \mathcal{D}_{|\mathcal{D}|} \\ \mathcal{J}_1 \ \mathcal{J}_2 \ \dots \ \mathcal{J}_1 \ \dots \ \mathcal{J}_{|\mathcal{J}|} \end{matrix}$$

Каждый элемент вектора x_i представляет собой возможную схему расположения устройств, то есть специальное место установки, которое обладает достаточными ресурсами для размещения одного устройства данного типа. Символы над x_i представляют собой комбинацию устройства \mathcal{D}_j и места установки \mathcal{J}_k . Элемент вектора x_i равен «1», если устройство \mathcal{D}_j , написанное над данным элементом, назначено на место установки \mathcal{J}_k , написанное над этим же элементом, и «0», если не назначено. Однако это включает в себя решения, которые не назначают устройство ни на одно место установки или назначают его сразу на несколько мест установки. Однозначное назначение достигается при помощи дополнительного равенства ($\mathcal{D}(i)$ – это устройство, написанное над x_i)

$$\sum_{i \in \{1, \dots, |\mathcal{D}| \mid \mathcal{D}(i) = \mathcal{D}_j\}} x_i = 1,$$

для каждого устройства j . По всем устройствам это выражение представлено в виде матрицы ограничений в виде равенства

$$A_{single}^{eq} = \left(\begin{array}{cccccc} \mathcal{D}_1 & \dots & \mathcal{D}_1 & \mathcal{D}_2 & \dots & \mathcal{D}_{|\mathcal{D}|} \\ 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{array} \middle| \begin{array}{c} \mathcal{D}_1 \\ \mathcal{D}_2 \\ \vdots \\ \mathcal{D}_{|\mathcal{D}|} \end{array} \right),$$

правая часть ограничений имеет вид:

$$b_{single}^{eq} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \mathcal{D}_{|\mathcal{D}|}.$$

Кроме того, назначения, которые превышают ограничения по ресурсам любого места установки, являются недопустимыми. Это выражено в виде неравенства

$$\sum_{i=1}^{|\mathcal{X}^{\mathcal{D}}|} \rho_{\Phi_j}(i)x_i \leq \rho_{\Phi_j}^{J_k}$$

для каждого типа ресурсов Φ_j , который имеется на месте установки J_k , где $\rho_{\Phi_j}(i)$ – количество ресурсов места установки, которые задействованы при выборе назначения i , $\rho_{\Phi_j}^{J_k}$ – количество ресурсов Φ_j – ого типа ресурсов, которыми располагает место установки J_k . Все ограничения, накладываемые на установочные ресурсы, представлены в матрице ограничений в виде неравенств.

Ограничения по месту установки должны быть учтены до начала процесса оптимизации. Нежелательные сочетания устройств и комбинации мест установки вычеркиваются из вектора решений, таким образом, пространство поиска сужается. Например,

$$x = \begin{pmatrix} \mathcal{D}_1 & \mathcal{D}_1 & \mathcal{D}_1 & \mathcal{D}_2 & \dots & \dots & \dots & \mathcal{D}_{|\mathcal{D}|} \\ J_1 & J_2 & \dots & J_1 & \dots & \dots & \dots & J_{|J|} \\ x_1 & x_2 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & x_{|\mathcal{X}^{\mathcal{D}}|} \end{pmatrix}$$

делает невозможным назначение устройства \mathcal{D}_1 на место установки J_2 . Та же процедура применяется для ограничений на разделение, требующих использования разнородных мест установки, на тот случай, если одна из выделенных задач не является частью задачи о назначении устройства, но уже имеет устройство с фиксированным назначением. В этом случае данное место установки запрещено использовать для устройств с другим типом задач, и соответствующие исходные параметры могут быть удалены из вектора решения.

Все остальные ограничения, накладываемые на разделение мест установки, должны обрабатываться в динамическом режиме. Они объединены одним неравенством

$$x_j + x_k \leq 1$$

для вероятности возникновения конфликтного назначения j, k . В матрице ограничений на разделение

$$A_{\subseteq} = \begin{pmatrix} \dots & x_j & \dots & x_k & \dots \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \vdots \end{pmatrix},$$

с правой частью ограничения

$$b_{\subseteq} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

размещены ограничения для всех конфликтующих между собой распределений.

Решение поставленной задачи бинарного программирования позволяет оптимизировать распределения устройств по заданным местам установки, с учетом естественных ограничений.

5. Парето оптимальное множество решений задачи оптимизации системы авионики

Как уже отмечалось выше, оптимизация архитектуры систем авионики является многокритериальной. Поэтому, в качестве ее решения естественно рассматривать так называемое Парето-оптимальное множество - множество решений, для которых не существует «лучших», в рамках выбранных критериев решений. Нахождение оптимума Парето отличается от традиционной одноцелевой оптимизации. Для идентификации Парето-оптимального множества необходимы специально разработанные процедуры многоцелевой оптимизации. Как правило, эти алгоритмы основаны на последовательном исключении доминируемых решений (решений для которых существует «лучшие» с точки зрения выбранных критериев).

Один из наиболее распространенных вариантов построения Парето-оптимального множества заключается в последовательной оптимизации однокритериальных задач при фиксированных значениях остальных критериев. Суть метода заключается в фиксации всех критериев, кроме одного, который остается свободным. После чего, производится вычисление свободного критерия. Далее операция повторяется с каждым критерием, до тех пор, пока значения всех станут постоянными. Для выпуклых пространств целей возможно получить Парето-оптимальное множество.

6. Заключение

Целочисленное программирование, в отличие от других рассмотренных алгоритмов гарантирует получение оптимального решения, исключает вероятность непредсказуемого поведения (путем полного перебора вариантов), ЦП имеет большое количество готовых, стандартных программных продуктов, для которых необходимо изменить постановку задачи. Решаемая задача, при помощи ЦП описывается отдельно от алгоритма решения, что позволяет использовать один алгоритм для всех уровней оптимизации распределенной бортовой сети. Недостатком ЦП является длительное время получения результата. Это связано в связи с необходимостью полного перебора вариантов. Однако проектирование архитектуры воздушного судна занимает большое количество времени, поэтому данный недостаток является несущественным, в рамках поставленной задачи. Для выбранного математического аппарата предложено решение, с учетом нескольких критериев, с использованием выборки по фронту Парето. В основе метода лежит тот факт, что пространство целевых критериев является дискретным и что критерии могут быть использованы в качестве ограничивающих условий. Процесс начинается в одной точке экстремума фронта Парето, и проводится систематическая выборка всех решений по фронту Парето.

Результаты работы использованы для создания программного обеспечения по оптимизации архитектуры распределенной бортовой сети.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-08-00463а.

Список литературы

1. Grabowski G., Balser B., Forster M. Integrated Modular Avionics with COTS directed to Open System and Obsolescence Management // Electronics. 2001. January. P. 23-25. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Севельсюк Н.И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66-71

2. Кучерявый А.А. Авионика. СПб.: Лань, 2016. 452 с.
3. Kravtsov V. Optimum Functions Distribution on IMA Components // European and Russian Joint Avionics Forum – New Generation of IMA Solutions for Future Aircraft. 2009.
4. Jackson B., A stochastic optimization tool for determining spacecraft avionics box placement // Proceedings, IEEE Aerospace Conference, 2002. Vol. 5. P. 5-2373-5-2382.