

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.725.7

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ СЕТЕВЫХ КАНАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. П. Корячко, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, д.т.н., профессор; koryachko.v.p@rsreu.ru

А. П. Шибанов, д.т.н., профессор кафедры САПР ВС РГРТУ; apshibanov@yandex.ru

А. Н. Сапрыкин, к.т.н., доцент кафедры САПР ВС РГРТУ; alexpizza@rambler.ru

Х. Л. Фам, аспирант РГРТУ, hoanglong2410@gmail.com

Целью исследований является решение задачи планирования полосы пропускания каналов сети передачи данных полигонного измерительного комплекса при проведении испытаний летательных аппаратов. Время передачи кадра измерительной информации моделируется нормированным распределением Эрланга второго порядка с учетом добавления постоянной составляющей времени передачи. Находится распределение времени передачи кадров измерительной информации с применением теории аналитических функций комплексного переменного. С использованием численных методов теории GERT-сетей определяется величина совокупной полосы пропускания каналов сети передачи данных. Оптимальное решение находится с применением генетических алгоритмов при ограничениях на среднее время передачи кадров от измерительных систем до центра управления испытаниями, а также при ограничениях на величину резерва полосы пропускания каналов. Приводится описание визуализации трафика в сети полигонного измерительного комплекса.

Ключевые слова: испытания летательных аппаратов, измерительная информация, сеть передачи данных, виртуальный канал, балансировка трафика, теория вычетов, распределение времени передачи кадра, полоса пропускания, генетические алгоритмы, визуализация трафика.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-52-57

Введение

При проведении летных испытаний изделий авиационной и ракетно-космической техники летательные аппараты (ЛА) переходят из зоны слежения одних измерительных пунктов (ИП) в зоны слежения других ИП. Поэтому трафик реального времени, передаваемый по каналам в центры управления (ЦУ) ходом полета, динамически меняется. Задержки и потери кадров по причине переполнения буферов в маршрутизаторах нежелательны и могут привести к срыву испытаний. Поэтому актуальной является задача обеспечения достаточной величины полосы пропускания каналов связи для обеспечения своевременной передачи измерительной информации (ИИ).

Необходимо определить величину полосы пропускания путей «из конца в конец» и отдельных каналов полигонного измерительного комплекса (ПИК), а также величину резерва полосы пропускания на случай возникновения pulsa-

ций трафика и отказов оборудования. При этом должна быть обеспечена передача ИИ в реальном времени при смене матриц трафика, вызываемой изменением направления полета ЛА и соответственно сменой источников ИИ. Расчеты с множеством вариантов выполняются заранее или в реальном масштабе времени.

Обобщенная структура сети передачи измерительной информации приведена на рисунке 1. Чаще всего это древообразная структура со сложной динамической маршрутизацией, так как постоянно меняются географические координаты испытуемых объектов. Петли в маршрутах исключаются.

Из рисунка 1 видно, что ЛА1, движущийся по траектории 1, сначала сопровождается двумя трассовыми ИП-ми (зона 1), затем двумя ИП-ми зоны 2, а затем ИП-м, расположенным в зоне 3. В зонах 4 и 5 находятся ИП-ы, передающие ИИ о движении ЛА2.

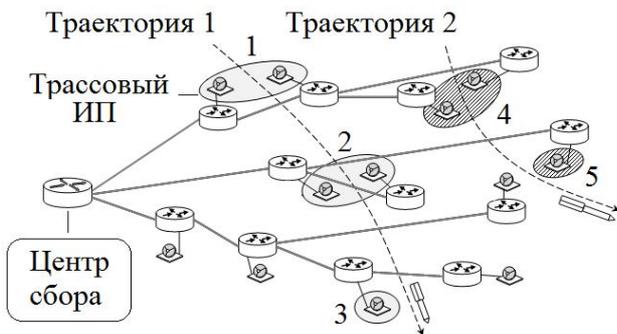


Рисунок 1 – Структура сети ПИК

Для одного виртуального пути «из конца в конец» [1-5] могут решаться следующие задачи:

- полный расчет распределения времени передачи кадра ИИ от маршрутизатора зоны до ЦС;
- частичная корректировка расчетов при удалении объекта в направлении от ЦС с сохранением данных предварительных вычислений;
- частичная корректировка расчетов при перемещении объекта в направлении к ЦС с сохранением данных предварительных вычислений.

Теоретическая часть

Переменная составляющая ξ времени передачи кадра ИИ аппроксимируется нормированным распределением Эрланга второго порядка при значении интенсивности $\mu = (0,1 - 2)$, выражаемом в миллисекундах. Кроме того, учитывается постоянная составляющая длительности передачи. Задержка прохождения ИИ по каналу сети t может быть представлена как $t = T + \xi$, где T – постоянная составляющая.

Изначально для текущих значений географических координат ЛА выполняются расчеты плотности распределения вероятностей времени передачи кадра ИИ для множества N виртуальных каналов соединения «из конца в конец» по выражению

$$f(t) = \sum_{m=1}^N \operatorname{Res}_{z=-2\mu_m} \left[4^N e^{zt} \prod_{\forall m} \frac{e^{-zT_m} \mu_m^2}{(2\mu_m + z)^2} \right]$$

через сумму вычетов относительно всех особых точек $z = -2\mu_m$ [1].

Если данный путь удлиняется на одно или несколько звеньев до величины N^+ , то производится корректировка расчетов по формуле:

$$\operatorname{Res}_{z=-2\mu_m} = 4 \prod_{\varepsilon=1}^{N^+} \mu_\varepsilon^2 e^{-2\mu_m \left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right)} \times \left\{ \left[\left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right) - A \right] / B \right\}, m = 1, N^+.$$

В выражении $A = \sum_{\forall n, n \neq m}^{N^+} 1 / (\mu_n - \mu_m)$ содержится

$N^+ - 1$ слагаемых. В разностях $\mu_n - \mu_m$ индекс n пробегает все значения от 1 до N^+ , кроме $n = m$; при этом значение m постоянно и равно номеру особой точки. В формуле

$B = \prod_{\forall n, n \neq m}^{N^+} (\mu_n - \mu_m)$ разности $\mu_n - \mu_m$ образуются подобно тому, как это выполняется для определения A . Последовательным добавлением сомножителей μ_ε^2 и T_ε формируется выражение

$$\prod_{\varepsilon=1}^{N^+} \mu_\varepsilon^2 \exp \left[-2\mu_m \left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right) \right].$$

Аналогично выполняется и корректировка вычетов, если число звеньев в пути «из конца в конец» уменьшается [1].

Определение полосы пропускания каналов

Прямой перебор возможных вариантов решений на древообразной структуре характеризуется экспоненциальной вычислительной сложностью. Поэтому для планирования трафика в сетевой инфраструктуре полигонного измерительного комплекса предлагается использовать генетические алгоритмы.

В каждом звене (в физическом канале) прокладывается множество виртуальных каналов, каждый из которых принадлежит одному из путей передачи кадров от источников ИИ до ЦУ. Для определения совокупной полосы пропускания звена полученные плотности распределения времени передачи кадров ИИ нужно перевести в распределения скоростей передачи, выраженные, например, в Мбит/с.

Для множества виртуальных путей от источников ИИ до ЦС, проложенных в общем физическом канале, необходимо определить суммарную полосу пропускания канала и ее резерв, необходимый для обработки пульсаций, прокладки резервных виртуальных каналов в случае отказов оборудования, реализации явных обратных связей, для обеспечения каналов управления и т.п.

Для каждого распределения вероятностей времени передачи кадра определяется скорость передачи. Наименьшим значениям времени передачи соответствуют наибольшие значения скорости передачи кадра ИИ.

Нахождение плотности распределения вероятностей величины полосы пропускания канала описано в работе [1]. Используется формула обращения с интерполяцией многочленом Лагран-

жа действительной и мнимой частей эквивалентной х. ф. свертки случайных величин, каждая из которых определяет величину полосы пропускания одного из виртуальных каналов.

Экспериментальные исследования

Топология сети представляется в виде ориентированного графа $G = (V, E, C)$, где V – это множество узлов сети, E – множество каналов (звеньев), а C – множество емкостей каналов и ограничений, связанных с этими каналами и узлами.

Обозначим через K – множество виртуальных каналов, $k \in K$, а (s_k, t_k, λ_k) есть узел отправления, узел назначения и требования к пропускной способности виртуального канала соответственно. Пусть виртуальный канал k прокладывается через физический канал (i, j) и

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если виртуальный канал } k \\ & \text{проходит через звено } (i, j), \\ 0 & \text{– в противном случае,} \end{cases}$$

а h_k обозначает ограничения на число частей виртуального канала k ; $(i, j) \in E$.

Трафик наиболее загруженных каналов перенаправляется в менее используемые части сети. В результате средний процент остаточной пропускной способности каналов достигает своего максимума. Это позволяет сети выдерживать возможные пульсации трафика без перенастройки соединений.

Пусть c_{ij} есть емкость канала (i, j) , а $\alpha_{ij} > 0$ – суммарное значение полосы пропускания множества виртуальных каналов в звене (i, j) . Возьмем подмножество $\Theta = \{\vartheta_1, \dots, \vartheta_M\}$ звеньев, которые имеют максимальное значение величины α_{ij} . Тогда математическое описание задачи оптимизации распределения нагрузки сети может быть представлено следующим образом:

- цель оптимизации – минимизация среднего значения совокупной полосы пропускания физических каналов сети ПИК:

$$\min \left(\bar{\alpha} = \sum_{r=1}^M \alpha_r / M \right),$$

где M – число звеньев сети ПИК;

- ограничения:

1) на каждый запрос нагрузка, попадающая в узел, должна быть равна нагрузке, исходящей из него в любой узел, кроме узла отправления и узла назначения:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0, k \in K, i \neq s_k, t_k;$$

2) общая пропускная способность для всех запросов канала не должна превышать уровень максимального использования общей емкости канала:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k x_{ij}^k \leq c_{ij}; \alpha, (i, j) \in E;$$

3) количество звеньев, через которые прокладывается виртуальный канал, ограничено:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k \leq h_k, k \in K.$$

Множество возможных маршрутов для k -го виртуального канала с конечными узлами (s_k, t_k, λ_k) , отвечающее приведенным выше условиям, может быть описано как:

$$Q_k = \{q_k^1, \dots, q_k^j, \dots, q_k^{\tilde{N}_k}\},$$

где $k \in K$ и q_k^j – возможные маршруты реализации k -го виртуального канала, \tilde{N}_k – число возможных реализаций k -го виртуального канала.

Задача оптимизации сводится к нахождению множества виртуальных каналов, проложенных в звеньях:

$$P = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_K\},$$

где $p_k \in Q_k$ при условии нахождения минимального значения $\bar{\alpha}$.

Определим далее:

$$\delta_{kl}^{pk} = \begin{cases} 1, & \text{если виртуальный канал } k \\ & \text{проложен по каналу } l \in E, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где l обозначает канал (i, j) .

Нагрузка канала $\gamma_p(l)$ и уровень использования $\alpha_p(l)$ могут быть представлены следующим образом:

$$\gamma_p(l) = \sum_{k=1}^K \delta_{kl}^{pk} \lambda_k, \alpha_p(l) = (1/c_l) \cdot \gamma_p(l).$$

В решении рассматриваемой задачи оптимизации важным является выбор значения переменной p_k , которая является NP-трудной. Поэтому для решения поставленной задачи используются генетические алгоритмы. В данном случае структура хромосомы определяется маршрутом виртуального канала, проложенного через промежуточные узлы сети. Хромосома описыва-

ется множеством последовательно расположенных элементов, соответствующих узлам следования виртуального канала по своему маршруту от начального узла отправления s_k до конечного узла назначения t_k .

Один из наиболее важных параметров хромосомы – ее размер определяется количеством промежуточных узлов маршрута. Число бит, отводимых на кодирование каждого узла, зависит от общего количества узлов сети. Однако существует вероятность возникновения некорректных хромосом за счет появления номеров узлов, отсутствующих в сети. Для восстановления таких хромосом до корректных значений используется механизм мутации.

При использовании генетического алгоритма должны быть выполнены следующие условия.

I. Должны быть отброшены все хромосомы, для которых не удовлетворяются требования на среднюю задержку передачи кадра и ее вариацию.

II. Для каждого виртуального канала должен быть выполнен пересчет распределения времени передачи кадра в распределение скорости передачи (в Мбит/с).

III. Для каждого звена (канала) определяется распределение занятой полосы пропускания как сумма случайных величин, задающих полосы пропускания виртуальных каналов. Занятая полоса пропускания устанавливается как $m + \vartheta \sigma$, где m – среднее значение распределения композиции законов распределения случайных значений полос пропускания проложенных виртуальных каналов; ϑ – целое число; σ – среднеквадратическое отклонение.

IV. Определяется значение величины $\bar{\alpha}$. Это усредненное значение по всем средним значениям распределений полос пропускания каналов.

При решении отмеченных выше задач вводится экспоненциальная штрафная функция. Чем меньше резервная полоса пропускания канала в полученном решении, тем больший штраф получает соответствующая хромосома. Соответственно и уменьшается значение ее функции полезности.

Графический интерфейс системы планирования полос пропускания каналов

При проведении летных испытаний авиационной и ракетно-космической техники на стартовой позиции, в вычислительном центре, штабе полигона, в районе приземления, в центрах управления, а также в организациях проекти-

ровщиков изделий устанавливаются большие демонстрационные табло для визуального отображения и контроля хода испытаний. На них выдаются цветные копии изображений с экранов компьютеров от распределенных систем, решающих различные задачи.

Отображение процесса передачи трафика в сетях передачи данных ПИК представляет собой важную задачу как на этапе подготовки к испытаниям, так и при их проведении. На этапе предстартовой подготовки инженеры-испытатели, имеющие возможности визуального контроля трафика в каналах, могут изучать закономерности его изменения в отдельных географических зонах; предсказывать возможность возникновения перегрузок в отдельных местах сети; визуально фиксировать нарушения в логике работы алгоритмов; выявлять возможности потерь кадров измерений и т. д.

В процессе проведения испытаний возможно возникновение нештатных ситуаций, индикатором которых является характерное изменение трафика. Например, прекращение (или уменьшение) трафика от отдельных измерительных систем может свидетельствовать о срыве сопровождения по азимуту, углу места или высоте. Уменьшение объемов трафика от отдельных ЛА может свидетельствовать о попадании их в зоны неустойчивого слежения, например, по причине временного прекращения сопровождения объекта измерительными средствами на фоне складок местности и т. п.

Важное значение для повышения качества как проведения испытаний в целом, так и тактико-технических характеристик технических средств имеет послеполетный анализ трафика.

Важна и реализация функции демонстрации общего хода испытаний. Это необходимо как инженерам-исследователям, так и для наблюдения за ходом испытаний представителям заказчиков, исполнителям проекта и другому заинтересованному персоналу. Визуальные схемы контроля трафика сети ПИК могут состыковываться со смежными системами, например с программами рисовки траекторий ЛА, с программами контроля и выдачи на экран остающихся запасов топлива в ЛА, демонстрации моментов разделения ступеней, отделения головных частей и их имитаторов и т. п. При этом в сети порождается транзитный трафик, являющийся результатом обработки первичных данных, получаемых с ИП. Эти процессы также влияют на величину и характер трафика.

Визуальное восприятие процесса испытаний улучшается, если он отображается на фоне географической карты местности (см. рисунок 2).

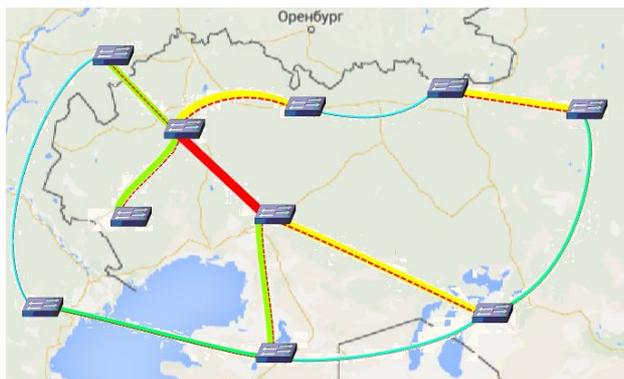


Рисунок 2 – Изображение сети передачи данных ПИК

При отображении состояния каналов целесообразно отмечать их состояние цветовой гаммой, в которой степень загрузки канала соответствует интенсивность окраски. Например, последовательному возрастанию трафика соответствует изменение цветов: зеленый, светло-желтый, темно-желтый, красный.

Кроме того, с изображением канала должны связываться его основные числовые характеристики и характеристики трафика. Из общего объема трафика можно выделить трафик тех виртуальных соединений, которые в данный момент представляют наибольший интерес. Состояние очередей коммутаторов и маршрутизаторов и тенденции их изменения также представляют интерес для проектировщиков сети ПИК, так как увеличение очередей приводит к неприемлемому увеличению времени пребывания кадров в сети и потерям кадров.

Разработана программа, которая предоставляет возможность записать готовую схему сети в файл путем выбора пункта меню «Сохранить как...». Для загрузки готовой схемы имеется пункт меню «Открыть...».

Выбор карты осуществляется с помощью команды меню «Настройки» – «Выбор карты» – «Открыть». Вместо изображения карты можно установить фоновый цвет с помощью команды меню «Настройки» – «Выбор карты» – «Выбрать цвет...».

Предусмотрена возможность отображения скорости и вида каналов. Загруженность канала отражена в цвете тонкой пунктирной линии, рядом с основным отрезком.

В программе предусмотрено три режима редактирования:

«перемещение коммутаторов» позволяет изменять положение коммуникационных узлов в сети;

«создание линий связи» предоставляет возможность редактирования каналов;

«изменение линий связи» делает активными контрольные точки кривых Безье у линий связи и предоставляет возможность менять кривизну отрезков.

Программный комплекс позволяет оперативно изменять изображение загрузки каналов в соответствии с изменениями матриц трафика в процессе испытаний ЛА.

Заключение

Предлагаемый метод определения полосы пропускания каналов полигонной сети передачи данных может быть использован:

- 1) для нахождения резерва полосы пропускания наиболее загруженного канала сети;
- 2) для определения среднего значения резерва полосы пропускания либо всего множества каналов сети, либо наиболее загруженных из них;
- 3) для модернизации сети в тех случаях, когда величина резерва полосы пропускания какого-либо канала недостаточна.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 14-07-00106-а.

Работа проведена в рамках выполнения госзадания № 9-14Г (№ государственной НИР: 115011560084).

Библиографический список

1. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Лукьянов О. В.** Характеристики сети передачи данных для проведения летных испытаний изделий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-1. С. 98-103.
2. **Ижванов Ю. Л., Корячко В. П., Шибанов А. П., Сапрыкин А. Н., Лукьянов О. В.** Оптимизация сетей с дозированной балансировкой нагрузки и пиринговыми каналами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 1(43). С. 67-74.
3. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Сапрыкин А. Н., Лукьянов О. В.** Планирование потоков в сети передачи данных опто-электронных средств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 55-59.
4. **Корячко В. П., Лукьянов О. В., Шибанов А. П.** Сеть передачи измерительной информации с разделением трафика на профили // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 9-15.
5. **Шибанов А. П., Шибанов В. А.** Вычисление распределения выходной величины GERT-сети с экспоненциальными и равномерно распределенными случайными величинами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 7. С. 1-9.

UDC 004.725.7

PLANNING BANDWIDTH NETWORK CHANNELS DURING TEST AIRCRAFT

V. P. Koryachko, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; koryachko.v.p@rsreu.ru

A. P. Shibanov, PhD (technical sciences), full professor, RSREU, Ryazan; mail@shibanov.ryazan.ru

A. N. Saprykin, Ph.D. , assistant professor of CAD RSREU; alexpizza@rambler.ru

X. L. Fam, post-graduate student, RSREU, Ryazan, hoanglong2410@gmail.com

The purpose of research is to solve the problem of channel bandwidth scheduling data network polygon measuring system for testing of aircraft. Transmission time measurement information of the frame is modeled by normalized second-order Erlang distribution with the addition of constant component of transmission time. Signal transmission frame time distribution is found with the help of the theory of analytic functions of a complex variable. With the use of numerical methods of the theory of GERT-network the value of aggregate bandwidth of data network channels is determined. The optimum solution is found using genetic algorithms with constraints on the average time frame of measurement systems to test control center, as well as restrictions on the amount of the reserve channel bandwidth. Visualization of traffic on the network description of measuring complex polygon is given.

Key words: test aircraft, measuring information, data network, virtual channel, traffic balancing, deductions theory, distribution of frame transmission time, bandwidth, genetic algorithms, traffic visualization.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-52-57

References

1. Koryachko V. P., Shibanov A. P., Lukyanov O. V. Kharakteristiki seti peredachi dannykh dlya provede-niya letnykh ispytaniy izdeliy. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 54-1, pp. 98-103 (in Russian).

2. Izhvanov Yu. L., Koryachko V. P., Shibanov A. P., Saprykin A. N., Lukyanov O. V. Optimizatsiya setey s dozirovannoy balansirovkoy nagruzki i piringovymi kanalami. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 1(43), pp. 67-74 (in Russian).

3. Koryachko V. P., Shibanov A. P., Saprykin

A. N., Lukyanov O. V. Planirovanie potokov v seti peredachi dannykh optiko-elektronnykh sredstv. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 50-1, pp. 55-59 (in Russian).

4. Koryachko V. P., Lukyanov O. V., Shibanov A. P. Set peredachi izmeritelnoy informatsii s razdeleniem trafika na profile. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2014, no. 10, pp. 9-15 (in Russian).

5. Shibanov A. P., Shibanov V. A. Vychislenie raspredeleniya vykhodnoy velichiny GERT-seti s eksponentsialnymi i ravnomerno raspredelennymi sluchaynymi velichinami. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. 2015, no. 7, pp.1-9 (in Russian).