

УДК 629.78: 621.398

Обработка измерительной информации в бортовых отказоустойчивых телеметрических системах с категорированием заявок

Ю. В. Гридин, В. С. Харченко

Харківський військовий університет

Надійшла до редакції 22.06.98

Пропонується варіант бортової телеметричної системи з відмовостійким комутатором, що обробляє потік інформації. На основі теорії масового обслуговування зроблені математичні моделі такої системи. За допомогою стохастичної імітаційної моделі досліджені черги заявок різних категорій.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Важнейшим элементом современных космических радиотехнических комплексов являются телеметрические системы (ТМС), посредством которых осуществляется сбор, хранение, передача и обработка телеметрической информации (ТМИ). Как известно, ТМИ представляет собой единственный источник данных о техническом состоянии бортовых систем космических аппаратов. Необходимость постоянного контроля бортовых систем обуславливает значительную избыточность ТМИ, передаваемой по обратному каналу радиолиний. Одним из требований, предъявляемых к ТМИ, является ее высокая достоверность, которая в наибольшей степени зависит от надежности бортовой телеметрической аппаратуры. Для съема измерительной информации с цифровых и аналоговых датчиков в бортовой телеметрической аппаратуре используются быстродействующие цифровые электронные коммутаторы (ЦК).

Поток измерительной информации, поступающей на ЦК, представляет собой совокупность показаний бортовых датчиков, опрос которых осуществляется с различной частотой. Это связано с градацией контролируемых параметров по важности, а также

с различной динамикой протекающих процессов. Следовательно, ЦК ТМС можно рассматривать как систему, осуществляющую обслуживание заявок различных категорий и приоритетов.

Категория заявки определяется согласно требованиям к надежности и достоверности ее реализации в условиях отказов и сбоев аппаратных и программных средств. С целью реализации этих требований на обслуживание заявки в системе выделяется различное число обслуживающих вычислителей (микропроцессоров). Под приоритетом заявки будем понимать требование ее первоочередного обслуживания по отношению к другим. То есть, понятия категории и приоритета следует рассматривать как взаимосвязанные, но разные характеристики процесса обслуживания.

Так как бортовые системы КА относятся к числу необслуживаемых, то высокую достоверность и надежность обслуживания заявок можно обеспечить приданием ЦК свойства отказо- или дефектоустойчивости, т. е. способности системы выполнять заданные функции в условиях возникновения отказов и сбоев аппаратных средств и проявления дефектов программных средств. Проведенные отечественными и зарубежными специалистами исследования показывают, что решение данной задачи для ЦК

ТМС возможно при реализации принципов построения многоальтернативных (многоверсионных) систем (МАС) [4]. Данные принципы базируются на свойстве адаптивности, которое основано на введении избыточности (временной, аппаратной и программной) и средств контроля, диагностирования и реконфигурации (СКДР) [3, 5]. Архитектурно современные МАС состоят из некоторого числа вычислителей и общих ресурсов (линии связи, память, устройства коммутации и т. д.).

Таким образом, возникает задача разработки и исследования моделей адаптивных отказоустойчивых ЦК ТМС с категорированием заявок на обработку измерительной информации.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦК ТМС С КАТЕГОРИРОВАНИЕМ ЗАЯВОК

Для представления ЦК с категорированием заявок в качестве объекта исследований необходимо решить задачу построения его математической модели. В качестве базовой модели в этих случаях используется графовая модель, предложенная Препарата, Метцом и Ченом (ПМЧ-модель). Система представляется ориентированным графом $G(B, E)$ без петель. Множество $B = \{B_1, \dots, B_n\}$ соответствует вычислителям системы, а множество дуг $E = \{E_1, \dots, E_m\}$ — информационным дугам. Под вычислителем B_i будем понимать i -й элемент (узел, микропроцессор) ЦК, выполняющий обслуживание заявки. В качестве моделей заявок, обслуживаемых ЦК, будем использовать модели, приведенные в таблице.

Из таблицы видно, что чем выше категория заявки K_i , $i = 1, \dots, 5$, тем выше возможности ЦК по обнаружению и исправлению неисправностей (в том числе вызванных программными дефектами).

Рассмотрим принятую модель ЦК как систему массового обслуживания (СМО) при следующих допущениях:

1) в систему поступает поток заявок K_i , с пока-

зательным распределением времени между требованиями $A(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ и интенсивностями $\lambda_i = \lambda$, $i = 1, \dots, 5$;

2) интенсивности обслуживания заявок K_i равны $\mu_i = \mu$;

3) число вычислителей B_j в системе бесконечно, т. е. $j = 1, \dots, \infty$.

4) при обслуживании заявок K_i реализуется дисциплина с относительным приоритетом.

Процессы размножения и гибели такой СМО будут описываться выражениями

$$\lambda_k = \lambda, k = 0, 1, \dots, n_s, \quad (1)$$

$$\mu_k = \mu, k = 1, 2, \dots, n_s,$$

где λ_k и μ_k — интенсивности переходов из состояния k в $(k + 1)$ и из $(k + 1)$ в k соответственно, причем k — число заявок на обслуживании в ЦК. Фрагмент графа состояний такой СМО приведен на рис. 1.

Каждое состояние на графе показывает число заявок в системе и их категории. Нетрудно убедиться, что число состояний N_s в такой системе зависит только от n_s :

$$N_s = \frac{1}{4} (5^{n_s+1} - 1). \quad (2)$$

Составление матрицы переходов и решение системы уравнений Колмогорова—Чепмена [1] позволяет получить вероятности $p(n_s)$ нахождения системы в состояниях, когда осуществляется обслуживание n_s заявок K_i .

$$p(n_s) = (\lambda/\mu)^{n_s} p(0), \quad n_s \geq 0. \quad (3)$$

Из нормирующего условия

$$\sum_{n_s=0}^{\infty} 5^{n_s} p(n_s) = 1, \quad (4)$$

используя (3), получаем

$$p(0) = \frac{1}{1 + \sum_{n_s=0}^{\infty} (5\lambda/\mu)^{n_s}}. \quad (5)$$

Модели обслуживаемых в ЦК ТМС заявок

Категория заявки, K_i	Выделяемые ресурсы (кол-во вычислителей), n_B	Признак многоверсионности программного обеспечения	Обнаруживаемые неисправности при мажоритарной обработке	Возможность исправления ошибок при мажоритарной обработке
1	1	—	нет	нет
2	2	—	аппаратные сбои и отказы	нет
3	2	+	аппаратные сбои и отказы, программные дефекты	нет
4	3	—	аппаратные сбои и отказы	есть
5	3	+	аппаратные сбои и отказы, программные дефекты	есть

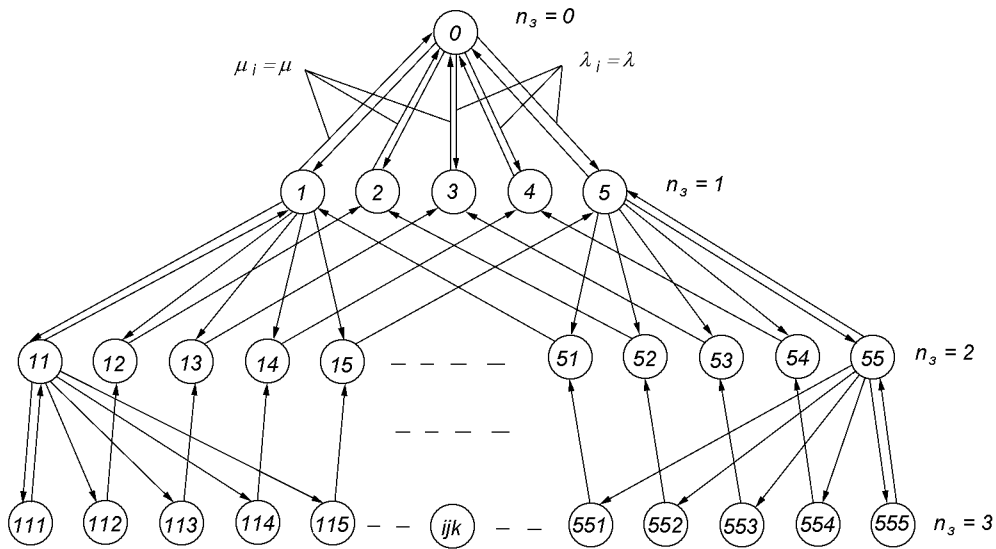


Рис. 1. Фрагмент графа состояний

Рассмотрим случай $\lambda/\mu < 0.2$, тогда сумма в знаменателе (5) сходится, и следовательно,

$$p(0) = 1 - \frac{5\lambda}{\mu}. \quad (6)$$

Таким образом,

$$p(n_3) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \left(1 - \frac{5\lambda}{\mu}\right), \quad n_3 \geq 0. \quad (7)$$

Из полученных выражений (6) и (7) нетрудно заметить, что ЦК с категорированием заявок при $\lambda/\mu < 0.2$ и принятых ранее допущениях адекватен классической нетривиальной СМО типа М/М/1 [1].

Рассмотрим теперь случай, когда в ЦК может быть использовано максимум n_b обслуживающих вычислителей $B_j, j = 1, n_b$. Это условие позволяет определить верхнюю и нижнюю границы числа обслуживаемых категорированных заявок K_1 в системе, т. е. $n_3 \in [n_b/3, n_b]$. Так как поступление заявок можно считать равновероятным, то среднее число заявок, находящихся на обслуживании, равно

$$\begin{aligned} n_3 &= \text{int} \left(\frac{\frac{2}{3} n_b + \frac{2}{2} n_b + n_b}{5} \right) = \\ &= \text{int}(0.533n_b) \approx \text{int}(0.5n_b), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\text{int}(x)$ — функция целой части от аргумента x .

Условия для процессов размножения и гибели в такой системе тогда примут вид

$$\lambda_k = \lambda, \quad k = 0, 1, \dots, n_3,$$

$$\mu_k = \min[\mu, \bar{n}_3 \mu] = \begin{cases} \mu, & 0 \leq k \leq \bar{n}_3, \\ \bar{n}_3 \mu, & \bar{n}_3 \leq k. \end{cases} \quad (9)$$

Соответственно, при $n_3 \leq \bar{n}_3$

$$p(n_3) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} p(0), \quad n_3 > 0. \quad (10)$$

Аналогично при $n_3 > \bar{n}_3$

$$p(n_3) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} p(0) \frac{1}{\bar{n}_3^{n_3 - \bar{n}_3}}, \quad n_3 > \bar{n}_3. \quad (11)$$

Теперь с помощью (10) и (11) можно записать выражение для $p(0)$:

$$p(0) = \left[1 + \sum_{n_3=1}^{\bar{n}_3-1} \left(5 \frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} + \sum_{n_3=\bar{n}_3}^{\infty} \left(5 \frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \frac{1}{\bar{n}_3^{n_3 - \bar{n}_3}} \right]^{-1}, \quad (12)$$

и следовательно,

$$p(0) = \left[\sum_{n_3=0}^{\bar{n}_3-1} \left(5 \frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} + \sum_{n_3=\bar{n}_3}^{\infty} \left(5 \frac{\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \frac{1}{\bar{n}_3^{n_3 - \bar{n}_3}} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Вероятность того, что поступающая заявка K_1 окажется в очереди, задается равенством

$$P_{\text{ож}} = \sum_{n_3=\bar{n}_3}^{\infty} 5^{n_3} p(n_3) = \sum_{n_3=\bar{n}_3}^{\infty} p(0) \left(\frac{5\lambda}{\mu}\right)^{n_3} \frac{1}{\bar{n}_3^{n_3 - \bar{n}_3}}, \quad (14)$$

которое позволяет получить модифицированную формулу Эрланга

$$P_{\text{ож}} = \frac{\sum_{n_3 = \bar{n}_3}^{\infty} \left(\frac{5\lambda}{\mu} \right)^{n_3} \frac{1}{n_3^{n_3 - \bar{n}_3}}}{\left[\sum_{n_3 = 0}^{\bar{n}_3 - 1} \left(5 \frac{\lambda}{\mu} \right)^{n_3} + \sum_{n_3 = \bar{n}_3}^{\infty} \left(5 \frac{\lambda}{\mu} \right)^{n_3} \frac{1}{n_3^{n_3 - \bar{n}_3}} \right]}. \quad (15)$$

Формула (15) определяет вероятность того, что поступающая в ЦК заявка K_1 не застанет требуемого числа свободных вычислителей B_j .

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЦК ТМС С КАТЕГОРИРОВАНИЕМ ЗАЯВОК

Особый интерес представляют ситуации, когда $5\lambda > \mu$. Здесь наиболее важными являются характеристики очереди категорированных заявок в зависимости от числа n_b , особенно для систем, работающих в масштабе реального времени. В общем случае очередь в СМО описывается формулой Литтла

$$\bar{N} = 5\lambda T, \quad (16)$$

где \bar{N} — среднее число заявок находящихся в очереди (длина очереди); T — время пребывания задачи в системе, которое представляет сумму времени обслуживания, равного $1/\mu$, и среднего времени ожидания заявок в очереди W , т. е.

$$\bar{N} = 5\lambda \left(\frac{1}{\mu} + W \right). \quad (17)$$

При $\mu \rightarrow \infty$ формула (17) упростится:

$$\bar{N} = 5\lambda W. \quad (18)$$

Для анализа характеристик \bar{N} и W была использована статистическая имитационная модель ЦК.

В результате проведенных на ПЭВМ экспериментов были вычислены статистические оценки \bar{N} и W при разном количестве вычислителей n_b . При расчетах оценок \bar{N} и W использовались их определения, данные в работе [1]. Характерной особенностью всех прогонов имитационной модели ЦК является спад значений \bar{N} и W на одних и тех же значениях n_b .

Результаты одного из расчетов при различных значениях соотношения $5\lambda/\mu$ (равного — 1, 5, 10, 15) представлены на рис. 2. Приведенные графики позволяют определить количество вычислителей, при котором ЦК будет работать в масштабе реального времени ($N, W \rightarrow 0$). При малых значениях числа вычислителей ($3 \leq n_b \leq 6$) увеличение значений N и W (за исключением случая $5\lambda/\mu = 1$)

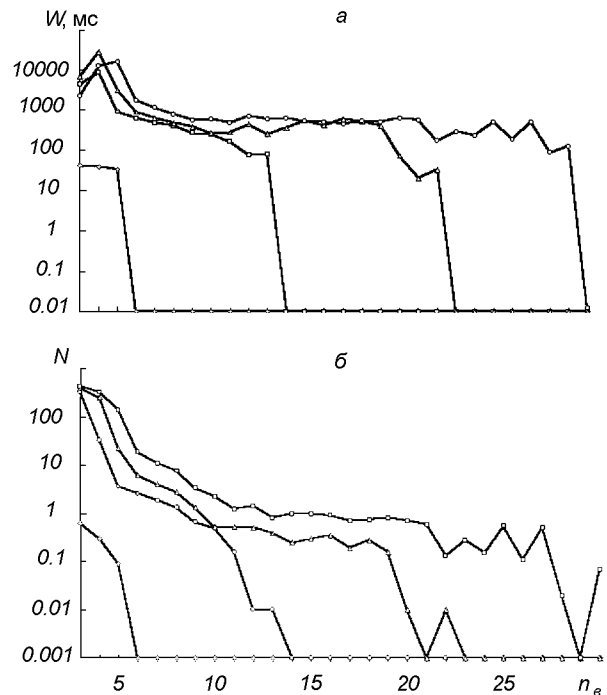


Рис. 2. Характеристики очередей: зависимость среднего времени ожидания заявки (а) и среднего количества заявок в очереди (б) от числа вычислителей. Ромбики, квадратики, треугольники и кружки — для $5\lambda/\mu = 1, 5, 10$ и 15 соответственно. Расчеты проведены для времени обслуживания одной заявки 1 мс

обусловлено отсутствием в системе незанятых вычислителей и возникновением ситуаций, когда числа незанятых вычислителей недостаточно для обслуживания заявки K_i , $i > 1$. Спад значений N и W до нуля происходит тогда, когда время загрузки системы заявками становится соизмеримым со временем обслуживания одной заявки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный математический аппарат и проведенные исследования имитационной модели позволяют эффективно оценивать показатели ЦК ТМС с категорированием на этапе разработки. Эти показатели можно рассматривать как потенциальные ввиду того, что ЦК считался идеальным с точки зрения надежности.

Полученные модели являются основой для создания отказоустойчивых ЦК ТМС, обслуживающих заявки различных категорий. Они позволяют в отличие от известных сформулировать требования к числу обслуживающих приборов (микропроцессо-

ров), при котором обеспечивается необходимый уровень надежности и достоверности обслуживания с учетом категории заявки.

Исследования и разработка адаптивных ЦК ТМС с категорированием являются актуальными ввиду того, что они дают возможность сократить объем аппаратного компонента бортовых систем за счет динамического использования ресурсов при обеспечении требуемой достоверности обработки информации.

Следует отметить, что режим категорирования заявок может использоваться и в других типах бортовых систем [2], а также в центрах обработки информации наземного автоматизированного комплекса управления.

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Неймана. — М.: Машиностроение, 1979.—432 с.
2. Стасев Ю. В., Горбенко И. Д., Пастухов Н. В. Аутентификация в космических системах связи и управления с множественным доступом // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 1/2.—С. 83—86.

3. Федоров И. И. Модель самодиагностирования для распределенных отказоустойчивых систем с деградацией структуры // Автоматика и телемеханика.—1990.—№ 1.—С. 136—144.
4. Харченко В. С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. — Харьков: МО Украины, 1996.—502 с.
5. Харченко В. С. Выбор технологии проектирования и базовых архитектур дефектоустойчивых цифровых управляющих и вычислительных систем реального времени // Космічна наука і технологія.—1997.—3, № 5/6.—С. 109—119.

ANALYSIS OF MEASUREMENT INFORMATION IN FAULT-TOLERANT BOARD TELEMETERING SYSTEMS WITH REQUEST CATEGORIZATION

Yu. V. Gridin and V. S. Kharchenko

We propose a spaceship board telemetering system with a digital fault-tolerant commutator designed for the processing of measurement data stream. The mathematical models of the system is based on the queueing theory. Queues of requests with different categories are studied by stochastic simulation.