

Практические исследования по созданию адаптивной системы информационно-телеметрического обеспечения запусков перспективных ракет космического назначения

А.В. Куимов¹, А.В. Кононенко²

¹ В/ч 32103

143090, Российская Федерация, Московская обл., г. Краснознаменск
ул. Октябрьская, 3

² АО «РКЦ «Прогресс»

443009, Российская Федерация, г. Самара
ул. Земеца, 18

Сформулировано существующее в современной практике информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет космического назначения противоречие. Предложен методический аппарат, позволяющий определить рациональную программу сбора информации при обеспечении запусков и тем самым установить соответствие потребностей в телеметрической информации возможностям средств передачи данных. Проведены практические расчеты по определению рациональной программы сбора телеметрической информации при проведении первого сеанса информационно-телеметрического обеспечения запусков ракет-носителей «Протон-М» с космодрома «Байконур». Получены математические описания зависимостей варьируемых параметров от параметров состояния системы информационно-телеметрического обеспечения. Проведены экспериментальные исследования и оценка результатов расчетов по определению программы сбора телеметрической информации, которые показали работоспособность разработанного методического аппарата и подтвердили преимущества программного подхода к формированию адаптивных процедур сбора информации при обеспечении запусков ракет космического назначения.

Ключевые слова: телеметрическая информация, оптимизация, программа, сбор информации, адаптивные процедуры.

Введение

Современные и перспективные РКН – это сложные высоко динамичные технические изделия, функционирование которых характеризуется сочетанием участков переходных процессов, связанных с запуском и остановом двигателей, отделением составных частей и участков установившихся режимов работы. Высокая сложность, экстремальные режимы и условия функционирования РКН приводят к необходимости измерений, сбора, обработки и оценки большого числа параметров, характеризующих состояние и режимы работы отдельных агрегатов и РКН в целом [1; 2]. Вместе с тем характеристики штатных и дополнительно привлекаемых средств передачи информации не позволяют осуществлять передачу подобного потока телеметрической информации (ТМИ) в реальном масштабе времени полета РКН. А несовершенство используемых методов сбора ТМИ не в полной мере обеспечи-

вает доставку информации, необходимой для оценивания функционирования РКН в реальном времени полета. В результате этого существующая система информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) запусков РКН характеризуется высокой информационной избыточностью, перегрузкой всех ее составных элементов, не содержащими полезной информации данными, вызванными жесткой программой работы телеизмерительных средств, не учитывающей изменения режимов функционирования бортовых систем ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ), изменяющиеся потребности в ТМИ на различных этапах пуска и полета РКН. Существующее противоречие привело к необходимости установления соответствия потребностей специалистов по анализу ТМИ возможностям средств передачи информации и обосновывает потребность в использовании адаптивного сбора ТМИ при обеспечении запусков современных и перспективных РКН.

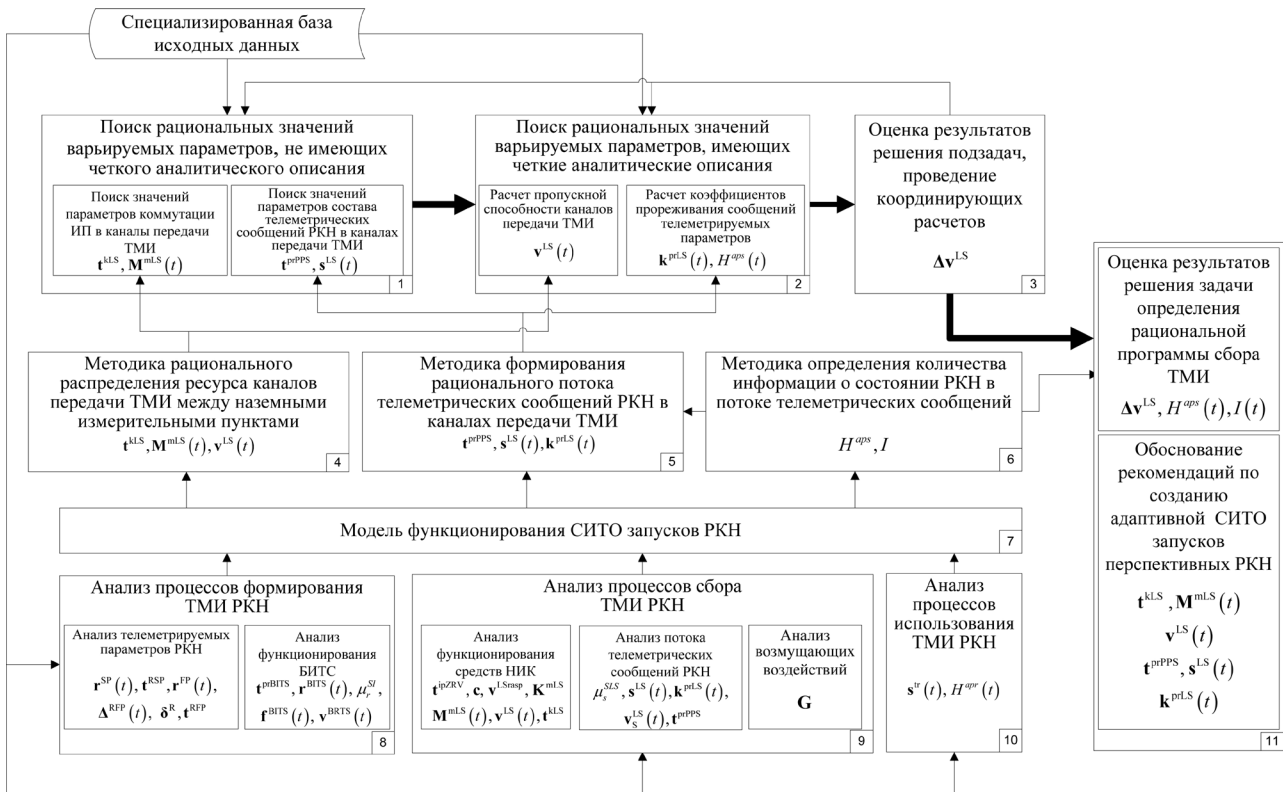


Рис. 1. Структурная схема методического аппарата определения рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН

1. Методический аппарат определения рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН

Анализ процессов функционирования СИТО запусков РКН и методических подходов к формированию адаптивных процедур показал, что установить соответствие потребностей в ТМИ возможностям средств передачи информации позволит использование адаптивных к состоянию РКН процедур сбора ТМИ на основе программного подхода [2–4], практическое использование которых заключается в определении рациональной программы сбора ТМИ, определяемой варьируемыми параметрами адаптивной СИТО.

Формализованное описание технических и информационных свойств, структуры и процессов функционирования СИТО, а также анализ математических методов оптимизации привели к целесообразности использования математического аппарата последовательной оптимизации для решения данной задачи [5; 6]. Определение рациональной программы сбора ТМИ методом последовательной оптимизации заключается в последовательном решении подзадач поиска рациональных значений четырех групп варьируемых параметров СИТО запуска РКН:

- параметров графика коммутации наземных измерительных пунктов (НИП) в каналы передачи ТМИ ($t^{kLS}, M^{mLS}(t)$);
- пропускной способности каналов передачи ТМИ ($v^{LS}(t)$);
- параметров графика выдачи телеметрических сообщений в каналы передачи ТМИ ($t^{prPPS}, s^{LS}(t)$);
- коэффициентов прореживания сообщений телеметрируемых параметров РКН ($k^{prLS}(t)$).

Согласование входных и выходных данных поисковых подзадач и сходимость решения исходной задачи обеспечивается посредством проведения координирующих расчетов. На заключительном этапе проводятся оценка результатов и обоснование рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН.

Исходя из цели потребителя ТМИ – определения состояния бортовых систем РКН при пуске и в полете, проводимые процедуры и расчеты направлены на выполнение критерия «обеспечение минимальной апостериорной энтропии сообщений телеметрируемых параметров РКН на выходе СИТО при ограничениях на информационную производительность по ресурсу пропускной способности телеметрических линий связи». Структурная схема методического аппарата приведена на рис. 1.

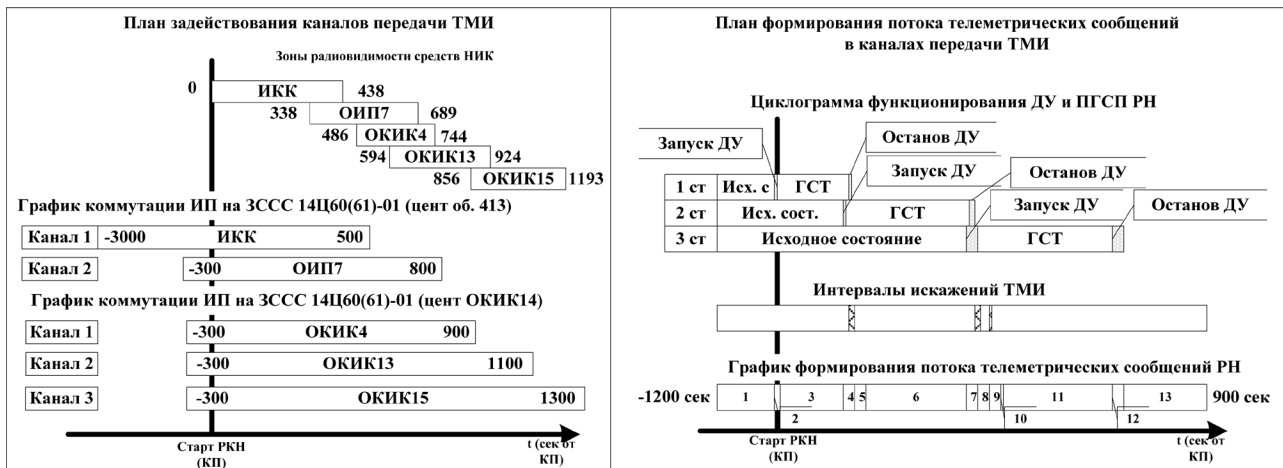


Рис. 2. Программа сбора ТМИ на первом сеансе ИТО запуска РКН «Протон-М» с РБ «Бриз-М»

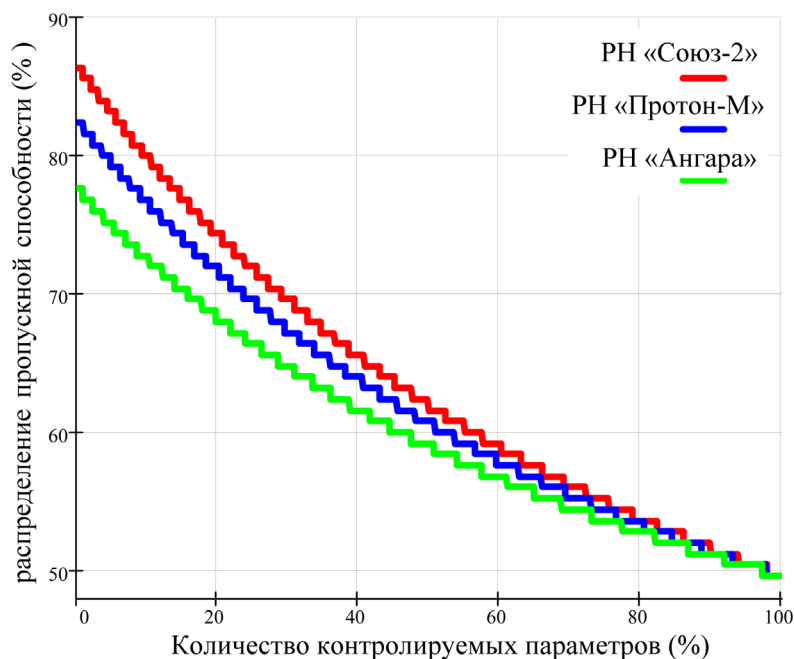


Рис. 3. График зависимости пропускной способности каналов передачи ТМИ

Решение поисковых подзадач проводится с помощью трех частных методик:

- рационального распределения ресурсов каналов передачи ТМИ между НИП;
- формирования рационального потока телеметрических сообщений РКН в каналах передачи ТМИ;
- определения количества информации о состоянии РКН в потоке телеметрических сообщений.

На основе разработанного методического аппарата проведены практические исследования, имеющие своей целью определить рациональную программу сбора ТМИ для конкретно заданных условий и исходных данных проведения информационного обеспечения запусков РКН и оценку их результатов.

2. Результаты расчетов по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запусков РКН

Прикладные расчеты по определению рациональной программы сбора ТМИ проведены на основе данных пуска и полета РКН в составе РН «Протон-М» – РБ «Бриз-М» при запусках «условно легких» космических аппаратов с космодрома «Байконур» в период с 2006 по 2018 г.

В процессе практических исследований проведено формирование расчетных данных, составляющих рациональную программу сбора ТМИ при проведении первого сеанса информационно-телеметрического обеспечения (ИТО) пуска и полета РКН, включающую план задей-

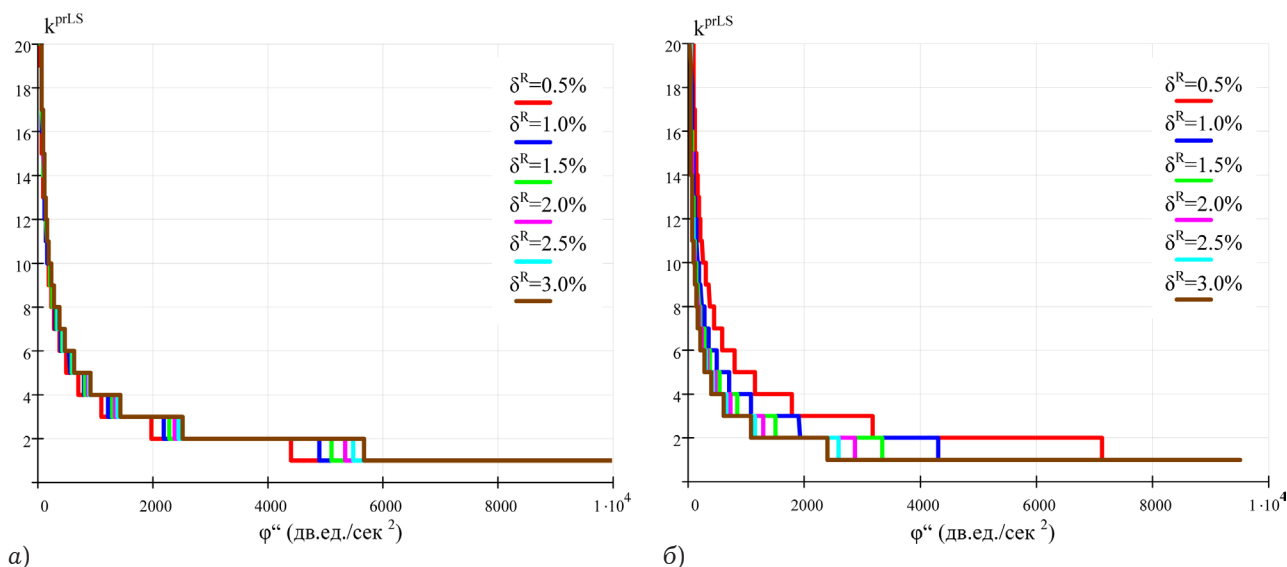


Рис. 4. График зависимости коэффициентов прореживания

ствования каналов передачи ТМИ и план формирования потока телеметрических сообщений. Разработанная программа сбора ТМИ позволяет осуществить непрерывную доставку телеметрических сообщений в центр контроля полета РКН в пределах зоны радиовидимости средств наземного измерительного комплекса (НИК), при этом обеспечиваются полный охват контролем телеметрируемых параметров РКН и компенсация потерь ТМИ на интервалах прогнозируемых искажений телеметрическими сообщениями, выдаваемыми через линию задержки статического кольцевого запоминающего устройства. Программа сбора ТМИ представлена на рис. 2.

При определении рационального плана задействования каналов передачи ТМИ сформирован график коммутации НИП в телеметрические линии связи и рассчитаны значения пропускной способности каналов передачи ТМИ.

На основе результатов проведенных расчетов получены математические описания зависимости распределения пропускной способности от соотношения количества контролируемых параметров на характерных участках полета РКН и структуры информационного потока для трех типов РН: «Союз-2», «Протон-М» и «Ангара» (рис. 3).

При определении рационального плана формирования потока телеметрических сообщений разработан график выдачи сообщений телеметрируемых параметров РКН в каналы передачи ТМИ и определены значения коэффициентов прореживания телеметрических сообщений в каналах передачи ТМИ. На основе результатов проведенных поисковых процедур получены

математические описания зависимости значений коэффициентов прореживания от динамики телеметрируемых параметров и точности бортовых средств измерений (рис. 4) для участков переходных процессов (а) и установившихся режимов функционирования РКН (б).

Полученные математические описания послужили основой для выработки рекомендаций по созданию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, направленных на рациональное распределение ограниченной пропускной способности телеметрических линий связи между каналами передачи ТМИ с НИП, в зависимости от компоновочной схемы, используемой при запуске КА РКН, и типом оснащаемых БРТС, а также на дифференцированное установление состава сообщений телеметрируемых параметров РКН и коэффициентов их прореживания с учетом параметров БИТС РКН и динамики изменения телеметрируемых параметров на характерных участках функционирования РКН при подготовке к пуску, при пуске и полете.

3. Оценка результатов расчетов по определению рациональной программы сбора ТМИ

Оценка работоспособности предложенного методического аппарата с учетом сложности объекта исследования осуществлялась с использованием опытно-теоретического подхода. В соответствии с принятыми концепциями методика оценки работоспособности включает в себя эксперимент, проведенный в полунатурных условиях с использованием материалов регистрации

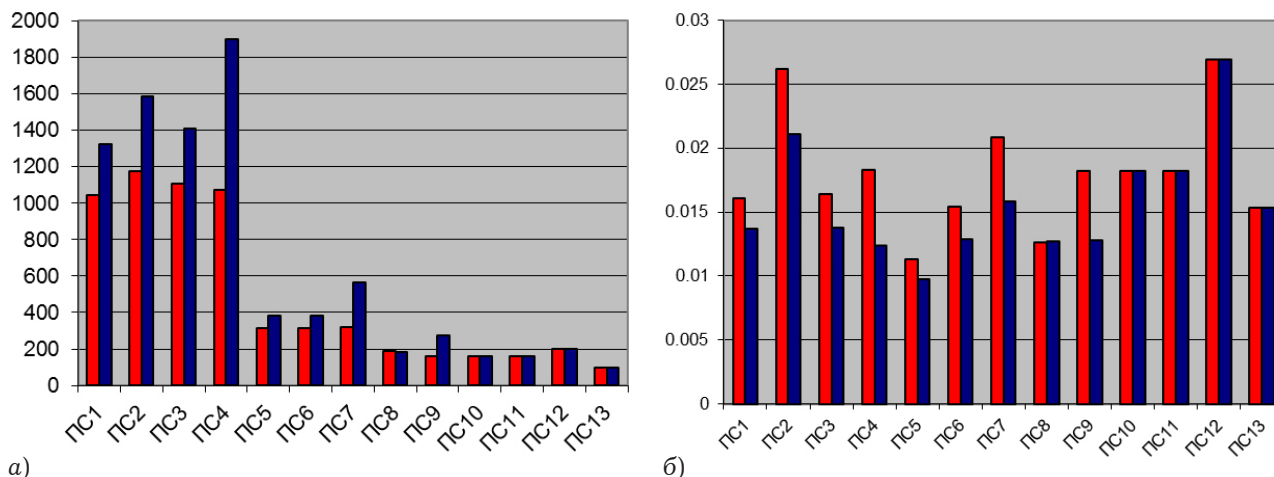


Рис. 5. Гистограммы показателей количества информации в потоке телеметрических сообщений РКН

ТМИ реальных пусков РН «Протон», а также имитационное моделирование возникновения и развития нештатных (аварийных) ситуаций на борту РН.

Оценка результатов решения по определению рациональной программы сбора ТМИ проведена по трем направлениям:

- оценке точности решения;
- оценке степени соответствия практических результатов цели исследований;
- оценке устойчивости функционирования СИТО к нерасчетным изменениям значений телеметрируемых параметров РКН, связанным с возникновением и развитием нештатных (аварийных) ситуаций на борту РКН.

Оценка проведена через сравнительный анализ показателей качества функционирования СИТО.

Накопление необходимых расчетно-экспериментальных данных проведено в ходе полунатурного эксперимента. В качестве входных данных при проведении экспериментальных исследований использованы материалы регистрации ТМИ, полученной в ходе информационного обеспечения пуска и полета РКН «Протон-М» – «Бриз-М» с космодрома «Байконур» при запусках «условно легких» КА в период с 2006 по 2018 г.

Проведенная оценка показала работоспособность разработанного методического аппарата. Разработанный методический аппарат определения рациональной программы сбора ТМИ обеспечивает необходимую точность решения задачи – расхождение расчетных данных относительно расчетно-экспериментальных составило 2,4–6 %.

Экспериментальные исследования подтвердили преимущества программного подхода для

формирования адаптивных процедур сбора ТМИ. Оценка результатов показала повышение качества функционирования СИТО запусков РКН. Снижение «апостериорной энтропии потока телеметрических сообщений» составило от 17,9 до 25,9 % в зависимости от этапа функционирования РКН, повышение «информативности потока телеметрических сообщений» составило от 16,5 до 24,2 %. На рис. 5 приведены значения «апостериорной энтропии потока телеметрических сообщений» (а) и повышение «информативности потока телеметрических сообщений» (б) при адаптивном (левые гистограммы) и неадаптивном (правые гистограммы) формировании потока телеметрических сообщений на этапах подготовки к пуску, пуска и полета РКН.

Кроме того, разработанная программа сбора ТМИ обеспечивает устойчивость функционирования СИТО запусков РКН к нерасчетным изменениям динамики телеметрируемых параметров РКН, связанных с возникновением и развитием нештатных (аварийных) ситуаций, потери информации не превысили 12,3 % от условий штатного функционирования. Графики зависимостей приращения апостериорной энтропии сообщений телеметрируемых параметров от нерасчетного увеличения динамики контролируемых процессов на борту РКН при значениях коэффициентов прореживания два (а), четыре (б) и шесть (в) приведены на рис. 6.

Заключение

Практические исследования подтвердили работоспособность разработанного методического аппарата и показали преимущества программного подхода к формированию адаптивных процедур сбора ТМИ при обеспечении запусков

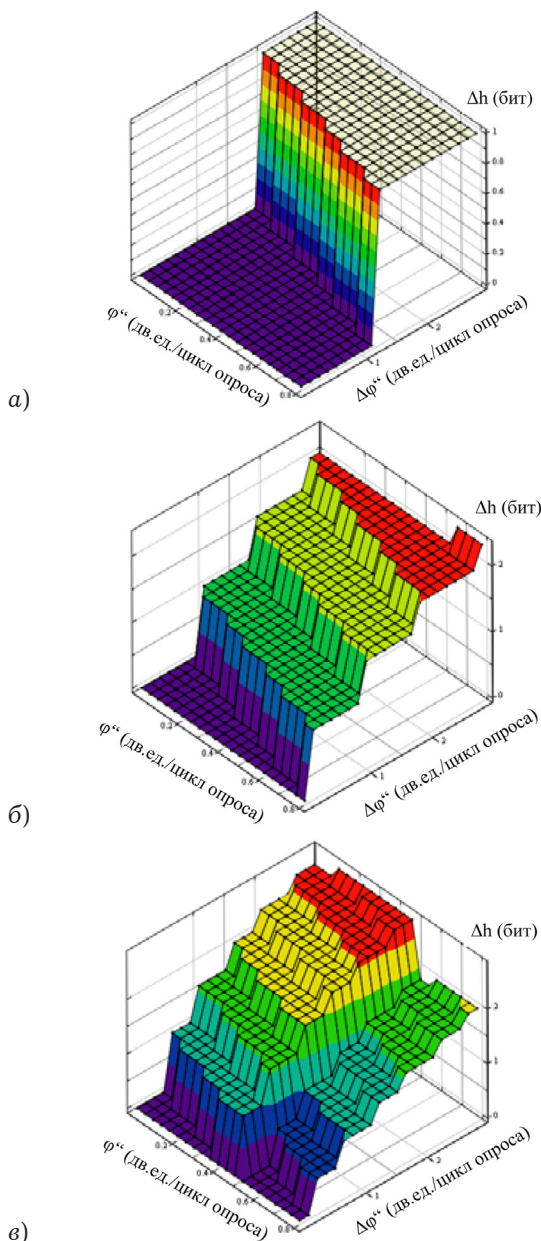


Рис. 6. Графики зависимостей приращения апостериорной энтропии от нерасчетного увеличения динамики контролируемых процессов на борту РКН

РКН. Предложенный методический аппарат позволяет определять рациональную программу сбора ТМИ и тем самым обеспечить специалистов по анализу функционирования бортовых систем РКН необходимой информацией в условиях ограниченного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи и изменяющихся на различных этапах запуска задач контроля полета РКН.

Полученные результаты решения задачи по определению рациональной программы сбора ТМИ при обеспечении запуска РКН и их оценка позволяют выработать рекомендации по созда-

нию адаптивной СИТО запусков перспективных РКН, которые учитывают все факторы, оказывающие существенное влияние на качество проведения ИТО запусков РКН и позволяющие провести параметрический синтез по созданию адаптивной СИТО запусков как современных, так и перспективных РКН.

Список литературы

1. Криницкий Е.И. Летные испытания ракет и космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 464 с.
2. Современная телеметрия в теории и на практике: учебный курс / А.В. Назаров [и др.]. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.
3. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: структура и алгоритмы, системотехническое проектирование: учеб. пос. для вузов. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
4. Рубичев Н.А. Измерительные информационные системы: учеб. пос. М.: Дрофа, 2010. 334 с.
5. Атетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: учеб. для вузов. 2-е изд., стереотип. / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 440 с.
6. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2 кн. Кн. 2: пер с англ. М.: Мир, 1986. 320 с.

References

1. Krinitskij E.I. Letnye ispytaniya raket i kosmicheskikh apparatov [Flight tests of rockets and spacecraft]. M.: Mashinostroenie, 1979, 464 p. [in Russian].
2. Nazarov A.V. [et al.] Sovremennaja telemetrija v teorii i na praktike: uchebnyj kurs [Modern telemetry in theory and practice: training course]. SPb.: Nauka i tehnika, 2007, 672 p. [in Russian].
3. Tsapenko M.P. Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: struktura i algoritmy, sistemotekhnicheskoe proektirovanie: ucheb. pos. dlja vuzov. 2-e izd. [Measuring information systems: structure and algorithms, systems engineering design: studies. pos. for universities. 2nd ed.]. M.: Energoatomizdat, 1985, 440 p. [in Russian].
4. Rubichev N.A. Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: ucheb. pos. [Measuring information systems]. M.: Drofa, 2010, 334 p. [in Russian].
5. Atetkov A.V., Galkin S.V., Zarubin V.S. Metody optimizatsii: ucheb. dlja vuzov. 2-e izd., stereotip. / pod red. V.S. Zarubina, A.P. Krischenko [Optimization methods: studies for universities. 2nd ed., stereotype / ed. by V.S. Zarubin, A.P. Krischenko]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2003, 440 p. [in Russian].
6. Reklejtis G., Rejvindran A., Regsdel K. Optimizatsiya v tekhnike: v 2 kn. Kn. 2: per s angl. [Optimization in technology: in 2 books. Book 2: trans. from English]. M.: Mir, 1986, 320 p. [in Russian].

Practical research on the creation of an adaptive information and telemetric system for launching promising space rockets

A.V. Kuimov¹, A.V. Kononenko²

¹ Military Base 32102
3, Oktyabrskaya Street

Krasnoznamensk, 143090, Russian Federation

² Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress
18, Zemetsa Street

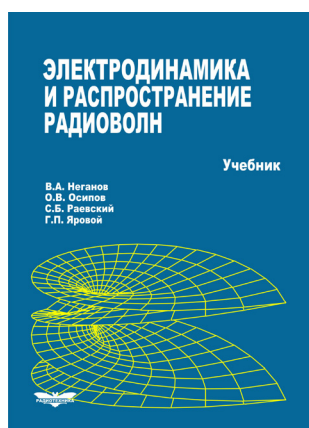
Samara, 443009, Russian Federation

The contradiction existing in modern practice of information and telemetric support of launching space rockets has been formulated. A methodical device is proposed, which allows defining a rational program for gathering information while ensuring launches and thereby establishing the correspondence of telemetric information needs to data transfer capabilities. Practical calculations were carried out to determine a rational program for collecting telemetric information during the first session of information and telemetric support for launches of Proton-M launch vehicles from the Baikonur cosmodrome. Mathematical descriptions of the dependencies of the variable parameters on the state parameters of the information-telemetric support system are obtained. Experimental studies and evaluation of the results of calculations to determine the telemetry information collection program were carried out, which showed the efficiency of the developed methodological apparatus and confirmed the advantages of the program approach to the formation of adaptive information collection procedures while ensuring the launch of space rockets.

Keywords: telemetric information, optimization, program, information collection, adaptive procedures.

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)
ББК 22.3
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.