В.А. Каргин,

*кандидат техн. наук, доцент;*

Д.А. Николаев

ЗАО «СКБ ОРИОН»;

Я.А. Скороходов

**ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ   
В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ**

Представлены аналитические зависимости оценивания моментных и спектрально-корреляционных характеристик с использованием алгоритмов подсчета числа пересечений траекторией телеметрируемого процесса заданных уровней. Предлагается способ обнаружения нелинейных изменений вероятностных характеристик телеметрируемых параметров, основанный на регистрации числа пересечений реализацией процесса заданных уровней. Сформировано признаковое пространство для различения процессов с ‒распределениями (Релея, Максвелла) и Гаусса.

Ключевые слова: характеристики «превышений уровней», выбросы траекторий случайных процессов, оперативная обработка, телеметрическая информации.

**ВВЕДЕНИЕ**

Совершенствование старых и разработка новых видов космических средств и электронно-вычислительных устройств, расширение круга решаемых задач и развитие современных информационных технологий приводит к увеличению объема телеметрической информации, требующейся для оценивания технического состояния космических средств и прогнозирования его изменения как в целом, так и отдельных систем и агрегатов. Это приводит к росту объема телеметрической информации, необходимой для принятия решений, связанных с управлением и контролем технического состояния космических средств. Для повышения достоверности и оперативности принимаемых решений в настоящее время ведется разработка специализированных аппаратно-программных комплексов. Они предназначены для решения задач оценивания технического состояния космических средств, для оперативного получения заключений о контролируемых событиях, происходящих на борту, и визуализации полученных результатов на средствах отображения информации полигонного комплекса [1].

Одним из современных и наиболее перспективных представителей космических средств выведения является ракета-носитель «Союз-2». Ракета-носитель представляет собой сложный динамический объект, состоящий более чем из 15 бортовых систем (двигательные установки, система стабилизации, система управления расходом топлива и др.), связанных между собой системой функциональных связей и информационного обмена. Объем данных о функционировании ракеты-носителя составляет 30–40 миллионов значений, поступающих за 9-10 мин активного участка полета (рис. 1).

Систематизация особенностей поступающей телеметрической информации выявила ее неоднородность, что не позволяет классическими методами провести синтез алгоритмов оперативной обработки и выполнить требования по качеству обработки информации в условиях жестких временных ограничений [5].



*Рис. 1. Телеметрическая информация, поступающая с датчика   
осевого ускорения блока «И» ракеты-носителя «Союз-2»;  
 частота опроса 200 Гц*

**ОЦЕНИВАНИЕ МОМЕНТНЫХ И СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ**

С целью разработки обобщенной модели поступающей телеметрической информации было проведено вероятностное исследование для наиболее информативных групп функциональных и функционально-диапазонных параметров с частотами опроса 50–200 Гц, полученных в ходе испытаний ракеты-носителя «Союз-2».

Результаты совместного исследования коэффициентов формы  и энтропии  оценок  результирующей плотности вероятности позволяют отнести их к семейству экспоненциальных распределений, близкому к гауссову, и могут быть аппроксимированы смесью из флуктуационной  и аномальной , компонент [2, 3, 4]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

где весовой коэффициент  представляет собой вероятность появления аномальной компоненты (по различным группам параметров ракеты-носителя «Союз-2» величина загрязнения достигает 0,03) и характеризует величину отклонения результирующего распределения от гауссова.

Аппроксимируя  рядом Эджворта [2, 4]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2) |

где  и , мы получаем, что величина -загрязнения фактически определяется значениями коэффициентов асимметрии  и эксцесса .

Близость полученных оценок результирующей плотности вероятности  к гауссовой также позволяет утверждать, что значения телеметрируемого процесса  и его производной  в совпадающие моменты времени статистически независимы:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (3) |

Тогда число положительных пересечений  заданного уровня  пропорционально значению одномерной плотности вероятности  [6]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

где  ‒ нормированная корреляционная функция процесса , как минимум, однократно дифференцируемого на всем интервале анализа .

Совместное использование аналитических зависимостей (2) и (4) позволяет при известных спектрально-корреляционных свойствах телеметрируемого процесса получить оценки , ,  путем простого подсчета числа превышений на трех уровнях. Выбрав значения  и оценив  по формуле (3), получим оценки , , :

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Выбор уровня (, ) позволяет свести , что дает возможность оценить коэффициенты  и  из следующих соотношений:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | (5) |
|  | (6) |

Таким образом, получение оценок моментных и спектрально-корреляционных характеристик с использованием алгоритмов подсчета числа пересечений траекторией телеметрируемого процесса заданных уровней тесно связаны между собой и позволяют наиболее простым способом решать задачу оценивания характеристик телеметрируемых процессов как во временной, так и в частотной области. Оценивание телеметрической информации на уровне спектрально-корреляционных характеристик позволит оценить  и довести аналитические зависимости до практической реализации.

Полученные оценки корреляционных функций  на режимах устоявшей работы бортовых систем и агрегатов ракеты-носителя представляют собой осциллирующую и быстро затухающую функцию.

Анализ результатов исследования формы полученных оценок  показал, что наиболее близкими к ним являются спектры Гаусса, Лоренца и равномерный. Эти модели спектров являются достаточно хорошо изученными и позволяют наиболее просто получать обобщенные спектрально-корреляционные характеристики телеметрируемых процессов. Для оперативной классификации информационных процессов с различными формами спектра предлагается использовать обобщенную характеристику  [7]:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (7) |

Характеристика  определяется корреляционной зависимостью между  и  в совпадающие моменты времени и содержит полную информацию о законе распределения высот локальных максимумов (рис. 2). Она позволяет проводить оценивание спектрально-корреляционных свойств с использованием характеристик «превышений уровней», но требует от телеметрируемого процесса, как минимум, двукратной дифференцируемости на всем интервале анализа .

|  |
| --- |
|  |

*Рис. 2. Плотности вероятности высоты локальных максимумов   
при различных значениях характеристики *

Поэтому вместо спектра Лоренца () в качестве типового был введен близкий к нему по коэффициенту формы () спектр №3 (табл. 1).

*Таблица 1*

**Характеристики «превышения уровня» и спектрально-корреляционные характеристики информационных процессов с различными формами спектра**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | 0,399 | 0,667 |  |  |  |  |  |  |
| 2 | 0,289 | 0,445 |  |  |  |  |  |  |
| 3 | 0,869 | 0,888 |  |  |  |  |  |  |

Анализ результатов исследования зависимости функций плотности вероятности высот локальных максимумов от характеристики  позволил сделать вывод, что зависимость изменения  этих трех моделей близка к линейной (отклонение не более 5 %), а сами значения наиболее равномерно перекрывают диапазон от узкополосного гармонического  до широкополосного  процессов (рис. 2).

**ОЦЕНИВАНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ**

Анализ статистических характеристик телеметрической информации в нештатных ситуациях показал, что вероятностное распределение отдельных ТМП отличается от гауссова и может быть аппроксимировано моделями несимметричных распределений (частными случаями -распределений). Поэтому возникает актуальная задача классификации ТМП по вероятностным характеристикам.

Оценивание коэффициента формы  и энтропии  сопряжено с большим объемом вычислений [для получения  требуется получение ], что делает их использование в алгоритмах оперативной обработки большого числа параметров (от 900 до 2000) практически невозможным. Таким образом, для оценивания статистических характеристик телеметрируемых процессов предлагается использовать характеристики «превышений уровней».

Одна из характеристик «превышений уровней» − среднее количество положительных пересечений заданного уровня  [6, 7]. В результате проведенных исследований была определена переходная характеристика  – отношение среднего количества положительных пересечений реализацией процесса с -распределением к среднему количеству пересечений гауссовского процесса на одинаковых относительных уровнях .

В частности, характеристика  для процесса:

‒ с распределением Релея (модуля двумерного вектора с независимыми гауссовскими компонентами):

|  |  |
| --- | --- |
| , | (8) |

с математическим ожиданием  и дисперсией  (параметром ) определяется выражением (рис. 3, а)

|  |  |
| --- | --- |
| , | (9) |

где ;

|  |  |
| --- | --- |
| отношение релей гаусс | рис релей к гауссу |
| а) | б) |

*Рис. 3. Отношение среднего количества пересечений процесса Релея   
к среднему количеству пересечений Гаусса (а); отношение среднего количества   
пересечений процесса Максвелла к среднему количеству пересечений   
процесса Гаусса на одинаковых относительных уровнях (б)*

‒ с распределением Максвелла (модуля трехмерного вектора с независимыми гауссовскими компонентами):

|  |  |
| --- | --- |
| , | (10) |

с математическим ожиданием  и дисперсией  (параметром ) определяется выражением (рис. 3, б)

|  |  |
| --- | --- |
| , | (11) |

где .

Характеристики  получены, если в качестве центра рассматриваемых типов вероятностных распределений принять математическое ожидание. Аналогичные характеристики могут быть определены и при других предположениях о центре распределения.

Дифференцируя выражения (9) и (11), получим

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |
|  | (13) |

Результаты контроля числа пересечений реализацией информационного процесса уровней, представленных в табл. 2, с заданной степенью уверенности позволяют сделать вывод о законе распределения наблюдаемого процесса (14), причем достоверность принятия решения зависит от количества уровней, подлежащих контролю, длительности контроля, самих значений относительных уровней.

Полученные результаты позволяют формализовать правило для принятия решения о законе распределения процесса следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
| ***if*** ();  ***else*** , | (14) |

где  – заранее определенные пороговые значения  при заданном уровне значимости;  – решение о  и гауссовом законах распределений соответственно.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| (а) | (б) |

*Рис. 4. Производная переходной характеристики *

Пределы изменения относительных уровней  определяются потенциальной точностью оценивания числа пересечений  по реализации стационарного процесса .

Таким образом, зависимости (5), (6) и (14) позволяют отслеживать переход контролируемых информационных процессов в «приграничное» состояние (которое характеризуется   
-распределением). Выражения (5) и (6) позволяют оценить степень «удаленности» наблюдаемого процесса от гауссова, а выражение (14) – обнаружить изменение вероятностного распределения процесса. Это достигается путем регистрации числа пересечений траекторией процесса заданных уровней (табл. 2). Алгоритмы, основанные на выражениях (5), (6) и (14) просты в реализации и не требуют больших вычислительных ресурсов. Это открывает широкие возможности по их использованию в средствах оперативной обработки телеметрической информации.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные исследования информационных процессов на входе комплексов автоматизированного анализа бортовых систем ракеты-носителя позволили:

* обосновать двухкомпонентную модель информационных процессов в виде смеси распределений (1);
* получать несмещенные оценки моментов одномерных распределений [соотношения (5) и (6)];
* оперативно разделять телеметрируемые процессы по форме спектра и оценивать их обобщенные спектрально-корреляционные характеристики;
* проводить классификацию телеметрируемых процессов по вероятностным характеристикам в реальном масштабе времени.

Таким образом, использование соотношений (4), (5), (14) и типовых спектральных плотностей (см. табл. 1) дает возможность проводить совместное оценивание моментов одномерных распределений и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик, делать заключения о законе распределения наблюдаемого процесса, и позволяет разработать алгоритмы оперативной подготовки телеметрической информации для автоматизированного анализа. При этом:

* достоверность обеспечивается возможностью разделения флуктуационной и аномальной компонент по критерию Неймана-Пирсона с заданным значением вероятности пропуска результатов измерений, содержащих аномальную погрешность (величина -загрязнения телеметрируемого процесса);
* робастность оценивания моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик достигается использованием характеристик «превышения уровня», инвариантных к дисперсии телеметрируемого процесса;
* оперативность достигается за счет совместного оценивания моментных и обобщенных спектрально-корреляционных характеристик телеметрируемых процессов.

**Список используемых источников**

1. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / М.Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р.М. Юсупов и др. // Информационные технологии. − 2011. − №10. − приложение, С. 14–20.
2. Модель измерительной информации в системах мониторинга космических средств / В.А. Каргин, Д.А. Николаев, А.Ю. Россиев, Д.Н. Бородько// Информационно-управляющие системы. − 2012. − №1. − С. 39−43.
3. *Новицкий П.В. Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений – Л.: Электроатомиздат, 1991. − 304 с.
4. Обобщенная модель измерительной информации в системах телеметрии реального времени / В.А. Каргин, О.В. Майданович, Д.А. Николаев, А.Ю. Россиев // Труды Международной научно-практической конференции «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях», AITA-2011, Москва, 4-8 апреля 2011 г. – М.:ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. ‒ 2011. ‒ C. 781‒789.
5. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном времени / В.А. Каргин, Д.А. Николаев, Н.В. Нездоровин, Е.Б. Самойлов // Информация и космос. − 2009. − №4.− С. 77−82.
6. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. − 1998. − №5. − С. 501−523.
7. *Тихонов В.И., Хименко В.И.* Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. − 305 c.