

УДК 681.326.3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В БОРТОВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ

В. Б. Кублановский,
генеральный директор, главный конструктор
ОАО «НИИ ВС «Спектр»

Предлагаются математические и имитационные модели входных информационных и мешающих сигналов, наблюдаемых в автоматизированных системах контроля бортовой аппаратуры летательных аппаратов. Модели основаны на экспериментальных данных, предназначены для отладки аппаратуры и программного обеспечения автоматизированных бортовых систем контроля, работающих в условиях жестко ограниченных временных и аппаратных ресурсов.

Ключевые слова — математическая модель, имитационная модель, информационный параметр, алгоритм обработки, система контроля.

В силу особенностей статистических характеристик входных информационных сигналов бортовой автоматизированной системы контроля (БАСК), а также сложности нелинейных алгоритмов их обработки единственным надежным методом проектирования аппаратуры и отладки программного обеспечения БАСК является метод математического моделирования. Именно поэтому вопросы синтеза эффективных алгоритмов моделирования информационных и мешающих входных сигналов БАСК, основанных на эмпирических данных, полученных в результате эксплуатации аналогичных систем контроля, чрезвычайно актуальны.

Бортовая автоматизированная система контроля является информационно-измерительной системой, предназначенной для сбора, хранения и обработки информации о параметрах аппаратуры летательного аппарата. Входной информационный поток БАСК состоит из нескольких тысяч сигналов, информация в которых представлена в аналоговой, цифровой, бинарной и кодовой формах. Сложность аппаратуры БАСК, содержащей значительное количество аппаратных средств обработки сигналов, а также сложность программного обеспечения приводят к необходимости построения простых, но адекватных математических моделей сигналов, которые требуются как

для синтеза алгоритмов обработки и аппаратных средств, так и для тестирования аппаратуры БАСК в целом.

Будем считать, так же как и в работе [1], что все вопросы, связанные с дискретизацией по времени и по уровню, решены в системе сбора информации, тогда в качестве математической модели наблюдаемых процессов можно принять математическую модель временных рядов [2]. В результате анализа записей БАСК-124 и последней версии БАСК-225 выяснилось, что большинство каналов регистрации БАСК содержат как гауссову помеху, которая в отличие от классических моделей временных рядов может иметь существенную корреляцию, так и негауссову помеху, в которой часто присутствуют аномальные выбросы. Более того, один и тот же канал может содержать гауссову коррелированную помеху, негауссову помеху и аномальные выбросы, обусловленные электромагнитными наводками и сбоями аппаратуры. При наличии таких помех в информационных каналах БАСК классические методы обработки временных рядов, особенно методы прогнозирования, могут оказаться не только слабо эффективными, но и вообще неработоспособными.

Ниже рассмотрим математические модели аномальных выбросов, негауссовых аддитивных

помех и гауссовой коррелированной помехи, а также алгоритмы их моделирования.

Для математического описания помех с аномальными выбросами можно использовать распределения с «утяжеленными хвостами», к которым относятся распределение Лапласа, а также составные распределения Тьюкки и Хьюбера. Если же информационный сигнал и помеха представляют собой неотрицательно определенные последовательности, то для описания аномальных выбросов используют экспоненциальное распределение, логарифмически-нормальное распределение и распределение Хьюбера с соответствующе подобранным засоряющим распределением [3]. Отметим, что модели Тьюкки и Хьюбера при определенном выборе параметров могут использоваться и для описания негауссовых распределений, т. е. эти модели применяются и для учета редких больших аномальных выбросов, и для описания небольших изменений распределений отсчетов временных рядов.

Модель Лапласа. Плотность распределения вероятностей отсчетов временного ряда x_i в соответствии с этой моделью записывается в виде

$$w(x_i) = 0,5\alpha \exp(-\alpha|x_i|), \quad -\infty < x_i < \infty, \quad (1)$$

где α — параметр распределения. Это распределение называют также двусторонним экспоненциальным распределением. Распределение имеет «утяжеленные хвосты» и часто используется для оценки робастности алгоритмов обработки сигналов. «Длинные хвосты» распределения Лапласа приводят к эффекту возникновения аномальных выбросов, но в силу того, что распределение определяется лишь одним параметром, его не очень удобно использовать в этих целях. Его нельзя применять, например, в ситуациях, когда информационный сигнал наблюдается в нормальных помехах и с известной вероятностью появляются аномальные отсчеты элементов временного ряда.

Модель Тьюкки является более гибкой, но и более сложной моделью, в соответствии с которой плотность распределения вероятностей отсчетов временного ряда x_i записывается в виде

$$w(x_i) = (1 - \xi_i) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left\{-\frac{x_i^2}{2\sigma_1^2}\right\} + \xi_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left\{-\frac{x_i^2}{2\sigma_2^2}\right\}, \quad (2)$$

где ξ_i — случайная величина, распределенная по закону Бернулли, принимающая значения 0 с вероятностью p и 1 с вероятностью $(1 - p)$. В выражении (2), представляющем собой смесь двух нормальных распределений, обычно полагают $\sigma_2 \gg \sigma_1$, что, собственно, и обеспечивает «утяжеление хвоста» основного нормального распределения. Эта

математическая модель при близких σ_1 и σ_2 и p , близкой к 0,5, может использоваться для описания негауссовой помехи, т. е. для описания небольших отличий от нормального распределения. При резко отличающихся σ_1 и σ_2 и p , близкой к 1, модель Тьюкки применяется для описания аномальных выбросов. Модель Тьюкки удобно использовать и для моделирования коррелированной негауссовой помехи. Для этого достаточно моделировать две последовательности нормальных случайных величин с требуемыми корреляционными характеристиками и «перемешивать» элементы этих коррелированных последовательностей с вероятностью p .

Модель Хьюбера является обобщением модели Тьюкки. Плотность распределения вероятностей отсчетов временного ряда x_i в соответствии с моделью Хьюбера записывается в виде

$$w(x_i) = (1 - \xi_i)w_1(x_i) + \xi_i w_2(x_i), \quad (3)$$

область определения $w(x_i)$ зависит от распределений $w_1(x_i)$ и $w_2(x_i)$, которые могут быть любыми; ξ_i — случайная величина, выполняющая «засорение» основного распределения $w_1(x_i)$ выборками из распределения $w_2(x_i)$, в качестве которого можно использовать и распределение Лапласа, и δ -функцию. В частности, эта модель позволяет моделировать помеху в виде коррелированного нормального шума (основное распределение) и аномальные выбросы, возникающие с вероятностью p , которые могут иметь и постоянное известное значение (сбой в старших разрядах), и быть случайными по своей величине (электромагнитные наводки). Эта модель подходит и для моделирования неотрицательно определенных временных рядов.

Экспоненциальная модель используется для моделирования неотрицательно определенных временных рядов. Плотность распределения вероятностей записывается в виде

$$w(x_i) = \alpha \exp(-\alpha|x_i|), \quad x_i \geq 0, \quad (4)$$

где α — параметр распределения; $w(x_i) = 0$ при $x_i < 0$. Экспоненциальная модель относится к распределениям с «утяжеленными хвостами» и часто применяется для тестирования робастности алгоритмов обработки сигналов [4].

Логарифмически-нормальное распределение, как и экспоненциальное, используется для моделирования неотрицательно определенных временных рядов. Плотность распределения вероятностей записывается в виде

$$w(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x_i} \exp\left\{-\frac{(\ln x_i - m_i)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad x_i \geq 0, \quad (5)$$

где m_i и σ^2 — параметры распределения, определяющие математическое ожидание и дисперсию отсчетов логарифмов x_i ; $w(x_i) = 0$ при $x_i < 0$.

Имитационные модели входных сигналов БАСК представляют собой алгоритмы моделирования перечисленных выше распределений. В том случае, когда отсчеты временных рядов являются независимыми случайными величинами, моделирование этих распределений не представляет труда, так как соответствующие алгоритмы содержатся практически во всех математических пакетах. Имитационные модели коррелированных сигналов как гауссовых, так и негауссовых требуют отдельного рассмотрения, в частности, они могут быть построены методами, изложенными в работе [5].

Подводя итог, отметим, что практически единственным методом исследования алгоритмов об-

работки сигналов в БАСК является метод математического моделирования, для реализации которого необходимы математические и имитационные модели входных сигналов. В работе предложено использовать пять основных моделей временных рядов, наблюдаемых системами БАСК. Рассмотренные модели являются достаточно простыми, и в то же время они выбраны на основе анализа реальных записей информационных и мешающих сигналов БАСК-124 и БАСК-225. Для отладки программного обеспечения БАСК потребуется создание имитаторов этих временных рядов, которые могут быть реализованы как аппаратно, так программно.

Литература

1. Кублановский В. Б., Кошелев С. В. Математические модели и алгоритмы сглаживания входных сигналов бортовых автоматизированных систем контроля // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2(45). С. 71–74.
2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Пер. с англ. И. Г. Журбенко, В. П. Носко. — М.: Мир, 1976. — 756 с.
3. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике: пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 304 с.
4. Кублановский В. Б., Песин Ф. Я. Технология разработки и отладки программного обеспечения бортовых автоматизированных систем контроля летательных аппаратов // Радиопромышленность. 1998. Вып. 1. С. 38–44.
5. Шепета А. П. Синтез нелинейных формирующих фильтров для моделирования входных сигналов локационных систем // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. (докл.), май 1994 г. / АН Украины, НПО Квант. Киев, 1994. Вып. 1. С. 81–85.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.