



УДК 378.147

Е. П. Ряховский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

П. Н. Топчий, С. Г. Почивалов

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Функциональное моделирование радиоканала управления космическим аппаратом на базе программно-аппаратного комплекса

Приведено краткое описание программно-аппаратного комплекса на базе модуля NI PCI-5640R фирмы "National Instruments". Разработанный комплекс позволяет выполнять полунатурные исследования радиоэлектронных систем управления космическими аппаратами в условиях воздействия преднамеренных помех. Использование комплекса в учебном процессе способствует преодолению разрыва между знанием теоретического материала обучающимися и их умением самостоятельно получать результаты анализа функционирования реальных систем.

Преднамеренная помеха, модуляция, трансивер NI PCI-5640R

Одной из наиболее важных тактико-технических характеристик радиоэлектронных систем (РЭС) управления космическими аппаратами (КА) является помехозащищенность, которая определяется рядом факторов:

- энергетическим потенциалом радиоканала;
- видом модуляции сигнала;
- методом расширения спектра;
- видом помехи и ее мощностью;
- структурой приемного устройства;
- реализованными в РЭС методами повышения помехоустойчивости и т. д.

Количественной мерой помехозащищенности является вероятность ошибки, возникающей при воздействии различного вида помех. Так, известно, что в условиях действия тепловых шумов средняя вероятность ошибки определяется выражением [1]

$$p_0(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_q^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du,$$

где q – отношение мощности сигнала к сумме мощностей собственного шума приемника и помехи.

При воздействии помех искусственного происхождения соотношения для вероятности ошиб-

ки становятся существенно более сложными, что затрудняет их использование при аналитическом описании исследуемого процесса. При этом процедура оценивания помехозащищенности становится громоздкой и теряет наглядность. Задача многократно усложняется при необходимости учета вида модуляции сигнала и характеристик фильтров, применяемых в тракте обработки сигнала [1]. Особую актуальность указанная проблема приобретает на этапе эскизного проектирования РЭС, когда задача оптимизации ее структуры с целью обеспечения требуемого уровня помехозащищенности решается перебором различных вариантов построения приемного тракта.

Для преодоления отмеченных трудностей разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяющий визуализировать процесс возникновения ошибок при управлении КА в условиях воздействия преднамеренных помех.

ПАК состоит из двух компонентов – программной части и аппаратной платформы. Основу программной части ПАК составили математические модели наиболее распространенных видов помех. В рамках формализованного подхода к математическому описанию все помехи разделя-

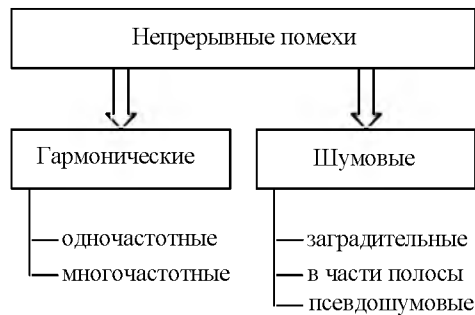


Рис. 1

лись на непрерывные и импульсные, при этом непрерывные помехи, в свою очередь, подразделялись на гармонические и шумовые (рис. 1).

Заметим, что корректность выбора математических формализованных соотношений для описания помех определялась введением некоторых ограничений, накладываемых на математические модели. Так, все помехи на входе радиоприемного устройства рассматривались как случайные процессы, при этом перечень помех был ограничен классом аддитивных стационарных гауссовских случайных процессов.

С учетом сделанных допущений относительно вида случайных процессов, которыми описывается помеха, при моделировании радиоканала управления КА помехозащищенность РЭС оценивалась в предположении, что на радиоканал могут воздействовать следующие виды помех искусственного происхождения [1]:

- гармоническая (одночастотная);
- многочастотная;
- псевдошумовая;
- заградительная;
- шумовая, сосредоточенная в части полосы.

Математические модели помех.

Гармоническая помеха. Модель гармонической помехи наиболее проста:

$$j(t) = \sqrt{2P_j} \cos(\omega_j t + \varphi), \quad (1)$$

где $j(t)$ – мгновенное значение напряжения, создаваемого помехой; P_j – мощность помехи; ω_j – частота помехи; φ – случайная фаза помехи, равномерно распределенная на интервале $[-\pi, \pi]$.

В модели (1) сомножитель $\sqrt{2P_j}$ можно рассматривать как амплитуду напряжения, создаваемого гармонической помехой на сопротивлении 1 Ом.

Многочастотная помеха может быть представлена как сумма N синусоид вида (1) равной мощности со случайными фазами φ_k . Ее математическая модель имеет вид

$$j(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{\frac{2P_j}{N}} \cos(\omega_k t + \varphi_k).$$

В приведенной модели мощность каждой синусоиды в N раз меньше мощности гармонической помехи, представленной моделью (1).

Псевдошумовая помеха с фазовой манипуляцией представляется математической моделью, также построенной на основе модели гармонической помехи (1):

$$j(t) = \sqrt{2P_j} g(t) \cos(\omega_j t + \varphi),$$

где $g(t)$ – псевдослучайная последовательность, символы которой принимают значения $+1$ и -1 . Данная форма представления псевдошумовой помехи справедлива при условии, что постановщик помех использует фазовую манипуляцию с индексом модуляции $\pi/2$.

Заградительная помеха и помеха, сосредоточенная в части полосы, рассматривались как стационарные случайные процессы в виде ограниченного по полосе аддитивного "белого" гауссовского шума (АБГШ). При моделировании этих помех использовались формирующие фильтры, на вход которых подавался дискретный "белый" шум со спектральной плотностью мощности $S_j(f)$, локализованный в определенной полосе. Поэтому в рамках формализованного подхода к описанию математических моделей данной группы помех достаточно задать их спектральные плотности мощности.

Мощность заградительной помехи сосредоточена в полосе частот информационного сигнала W_s . Помеха этого типа характеризуется спектральной плотностью мощности

$$S_j(f) = P_j / W_s.$$

Шумовая помеха, сосредоточенная в части полосы, характеризуется равномерным распределением мощности шума P_j в полосе частот W_j , являющейся частью ρ полосы частот W_s , занимаемой сигналом: $\rho = W_j / W_s \leq 1$. При этом спектральная плотность мощности помехи определяется соотношением

$$P_j / W_j = (P_j / W_s) (W_s / W_j) = S_j / \rho.$$

Формализованная математическая модель этой помехи представлена зависимостью, связывающей полосу частот W , спектральную плотность мощности помехи S_j и параметр ρ :

$$S_j(f) = \begin{cases} P_j / (\rho W_j), & W = W_j = \rho W_s; \\ 0, & W = (1 - \rho) W_s. \end{cases}$$

Кроме преднамеренных помех в приемном тракте РЭС неизбежно присутствуют тепловые шумы, которые рассматривались как ограниченный по полосе АБГШ. При определении спектральной плотности мощности этих шумов учитывалось, что в диапазонах частот, в которых работают спутниковые системы, шумы, создаваемые различными источниками, имеют аддитивный характер, а их суммарная мощность $P_{ш}$ при условии согласования внутреннего сопротивления источника шума и нагрузки определяется как

$$P_{ш} = kT_{\Sigma} \Delta f_{ш} = N_0 \Delta f_{ш},$$

где $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T_{Σ} – эквивалентная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов; $\Delta f_{ш}$ – эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приемника; $N_0 = kT_{\Sigma}$ – спектральная плотность мощности шума.

Аппаратная часть ПАК выполнена на базе модуля NI PCI-5640R фирмы "National instruments". Модуль NI PCI-5640R имеет интерфейс PCI, что позволяет устанавливать его в PCI-слот компьютера. В состав модуля входят два трансивера со следующими параметрами¹:

- количество каналов на прием/на передачу – 2/2;
- разрешение ЦАП/АЦП – 14 бит/14 бит;
- максимальная тактовая частота ЦАП/АЦП – 100/200 МГц;
- максимальная полоса пропускания – 20 МГц;
- диапазон входных частот – 0.1...100 МГц.

При моделировании процессов функционирования канала управления КА в условиях воздействия преднамеренных помех один из трансиверов используется для формирования помехи, другой – для формирования разовых команд (РК) управления космическим аппаратом.

Принципиальной особенностью ПАК является возможность работы модуля NI PCI-5640R под управлением среды LabVIEW [2]. Применение пакета расширения NI Modulation Toolkit из библиотеки функций LabVIEW позволяет формировать сигналы со стандартными и с пользовательскими видами модуляции, варьировать значения полос пропускания трансиверов, а также реализовывать различные варианты расширения спектра сигналов применительно к типу исследуемой РЭС.

Структурно-логическая схема ПАК представлена на рис. 2.

Высокочастотное колебание, модулированное информационным сигналом, излучается передатчиком первого трансивера, входящего в состав модуля NI PCI-5640R, сигнал помехи – передатчиком второго трансивера, также входящего в состав этого модуля. Оба сигнала одновременно поступают

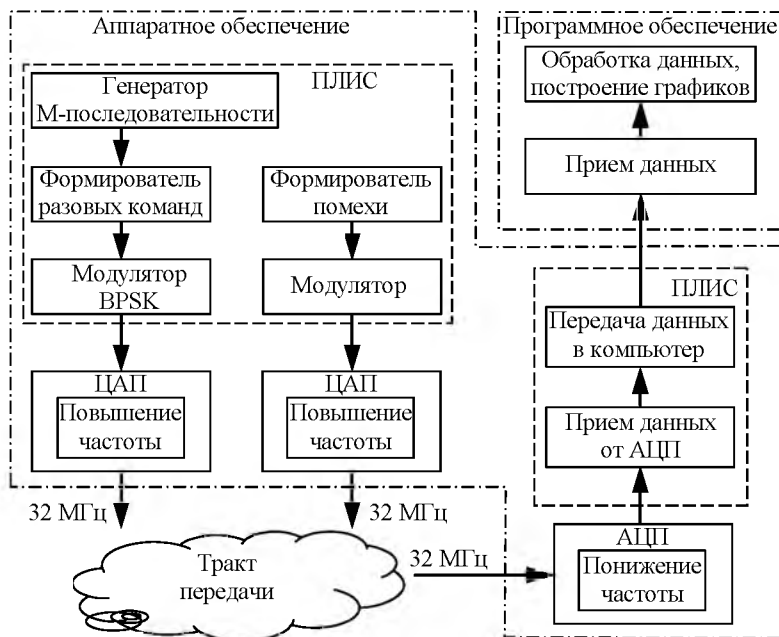


Рис. 2

¹ NI PCI-5640R specifications. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371620c.pdf>

на антенный вход приемника, входящего в состав первого трансивера модуля NI PCI-5640R.

Частота радиосигнала в процессе функционального моделирования радиоканала принимается равной 32 МГц, что соответствует промежуточной частоте радиоприемного устройства наземной станции системы управления КА. На этой же частоте формируется и сигнал помехи.

Модуль NI PCI-5640R при работе под управлением LabVIEW оперирует квадратурными составляющими (I , Q) сигнала. После преобразования в ЦАП сигнал, сформированный в квадратурах, переносится на радиочастоту. Принятый радиосигнал после понижения частоты и аналого-цифрового преобразования представляется в виде отсчетов квадратур.

Разработанный ПАК может использоваться как при эскизном проектировании РЭС управления КА, так и в учебном процессе. Применительно к учебному процессу его достоинством является удобный для обучения формат представления механизма воздействия преднамеренных помех на информационный канал и возможность оценивания степени их деструктивного воздействия при различных отношениях "сигнал/помеха". С этой целью в состав ПАК включен виртуальный прибор MT Format Constellation.vi из библиотеки функций NI Modulation toolkit, отображающий на комплексной плоскости принятый сигнал в системе координат $I-Q$. В качестве примера на рис. 3 представлен вид исследуемого сигнала с модуляцией BPSK при его отображении в квадратурах (ось абсцисс – синфазная составляющая сигнала I , ось ординат – квадратурная составляющая Q).

В приведенном примере в верхней полуплоскости шкалы виртуального прибора точкой отображается информационный символ 0, в нижней – 1.

Информационные символы формируются семизрядным генератором псевдослучайной последовательности, который формирует периодически повторяющуюся последовательность, состоящую из 127 символов.

В отсутствие помех при однократном включении этого генератора в верхней полуплоскости фиксируются 63 символа, в нижней – 64 (рис. 3, *а*). Точки, отображающие информационные символы 0 и 1, локализованы в соответствующих полуплоскостях, расстояние между ними определяется амплитудами составляющих сигнала.

При воздействии шумовой помехи (рис. 3, *б*) положение точек (символов информации) на комплексной плоскости размывается. Ошибки возникают при перемещении точки, отображающей символ информации, из верхней полуплоскости в нижнюю и наоборот.

На рис. 3, *в* приведен пример воздействия на РЭС гармонической помехи для случая, когда частота помехи отличается от центральной частоты сигнала.

Для получения экспериментальной зависимости вероятности ошибки на бит передаваемой информации от отношения "сигнал/помеха" синтезирован виртуальный прибор, являющийся составной частью ПАК. Он позволяет выводить на экран график указанной зависимости.

На рис. 4 представлена фронтальная панель АПК. Управляющие элементы фронтальной панели позволяют выбирать один из четырех видов помех: гармоническую, полигармоническую, шумовую либо помеху, сосредоточенную в части полосы (1). Для каждого вида помех выбирается значение ее расстройки относительно центральной частоты сигнала (2) и отношение мощности сигнала к мощности помехи (3). Для помехи, сосредоточенной в части полосы, кроме того, задается от-

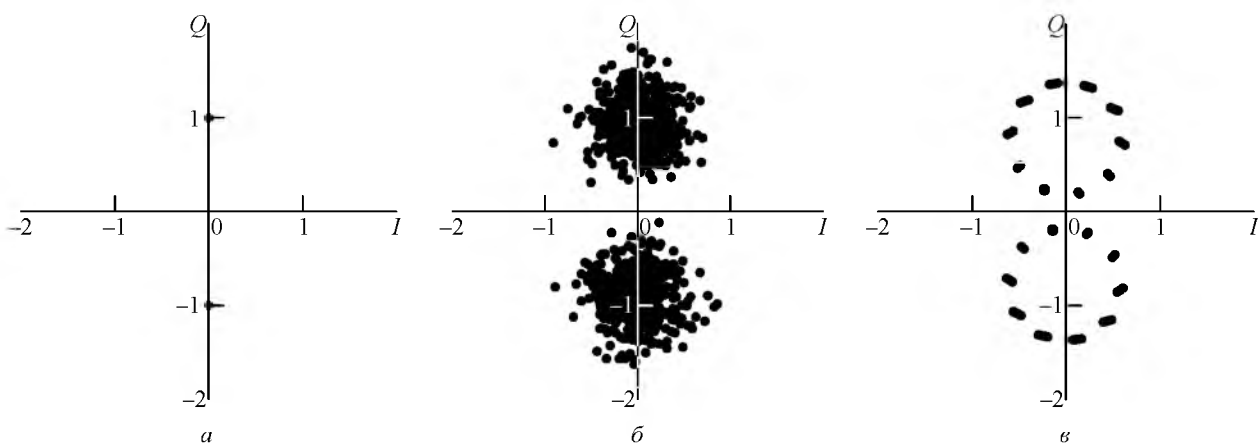


Рис. 3

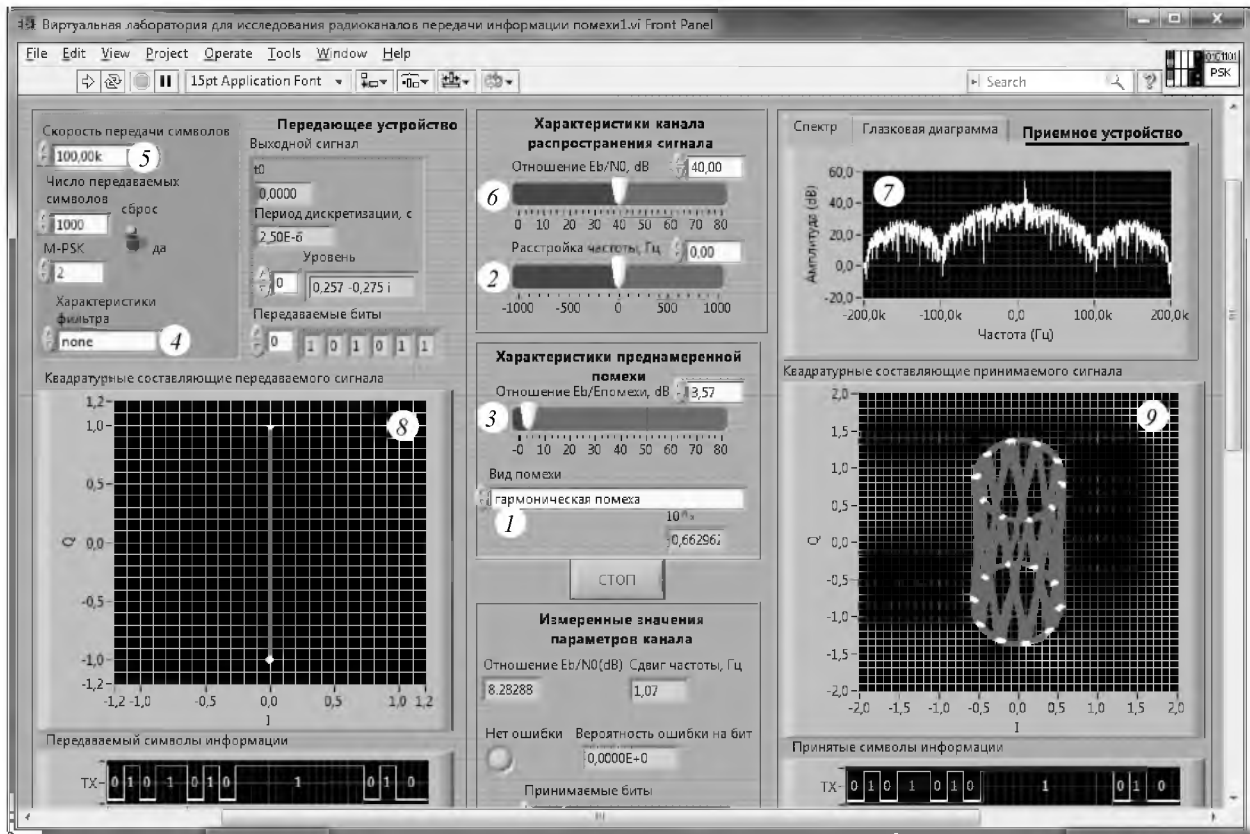


Рис. 4

ношение полосы частот, занимаемой помехой, к полосе сигнала. Также на фронтальной панели находится переключатель, позволяющий из набора фильтров, ограничивающих полосу передаваемого сигнала, выбирать необходимый (4), и регулирующие элементы, позволяющие изменять скорость передачи информации (5). Кроме того, предусмотрено изменение отношения энергии информационного бита E_b к спектральной плотности гауссовских шумов N_0 в радиоканале (6). Отдельный виртуальный прибор отображает спектр входного сигнала, подверженного воздействию помех (7). Амплитудно-фазовые распределения передаваемого и принимаемого сигналов отображают виртуальные мониторы 8 и 9 соответственно. Линии, соединяющие позиции символов, показывают межсимвольные переходы.

На этапе эскизного проектировании РЭС управления КА применение разработанного ПАК позволяет сократить временные затраты, связанные с выбором структуры РЭС, обеспечивающей требуемый уровень помехозащищенности в условиях воздействия преднамеренных помех. Применение ПАК в учебном процессе позволяет сделать более наглядным механизм возникновения ошибок при передаче информации и облегчает восприятие процессов, происходящих в радиоканале в условиях воздействия преднамеренных помех. Это способствует преодолению разрыва между знанием теоретического материала обучающимися и их умением самостоятельно получать результаты анализа функционирования реальных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев и др.; под ред. В. И. Борисова. М.: Радио и связь, 2003. 640 с.

2. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / под ред. В. П. Федосова. М.: ДМК Пресс, 2007. 472 с.

E. P. Ryachovsky

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

P. N. Topchy, S. G. Pochivalov

Military space academy n. a. A. F. Mozhaisky

Functional modeling of the radio channel spacecraft control based on hardware and software system

The brief description of a hardware-software complex (HSC) on the base of module NI PCI-5640R of firm National Instruments is resulted. The developed complex allows to carry out half-nature researches of radio-electronic systems (RES) managements of space vehicles (SV) in conditions of influence of intentional interferences. Using of a complex in educational process promotes overcoming the break between students' knowledge of a theoretical material and their skill independently to receive results of the analysis of functioning of real systems.

Intentional interference, modulation, transceiver NI PCI-5640R

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2015 г.