

Разработка моделей первичных сигналов в программной среде MathCAD

Роман АНТИПЕНСКИЙ
antic@vmail.ru

В статье рассматривается методика разработки моделей первичных сигналов в программной среде MathCAD для их дальнейшего использования в системах схемотехнического моделирования радиоэлектронных устройств. Материал может оказаться полезным разработчикам аналоговой аппаратуры, а также студентам, аспирантам и преподавателям, специализирующимся в области проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств, предназначенных для обработки аналоговых сигналов.

При проектировании и моделировании радиоэлектронных устройств с помощью систем схемотехнического моделирования (ССМ), таких как OrCAD, Microcap DesignLab [1], и других, часто приходится использовать различные источники сигналов для проверки проектируемой схемы на предмет безыскаженной передачи (преобразования) первичного сигнала. При этом имеющиеся в подобного рода программах источники сигналов не всегда в полной мере удовлетворяют запросам разработчиков. Для исследования характеристик схем в условиях воздействия реальных сигналов и помех часто приходится разрабатывать собственную модель сигнала, а затем использовать ее при моделировании схемы в ССМ. В связи с этим весьма полезным является освое-

ние принципов построения моделей сигналов, используемых в радиоэлектронных устройствах. Настоящая публикация знакомит читателя с методикой разработки моделей первичных сигналов с использованием программной среды MathCAD [2] и последующего их использования в качестве источников сигналов из внешнего файла в ССМ радиоэлектронных устройств DesignLAB.

К первичным (модулирующим) сигналам обычно относят сумму нескольких гармонических составляющих (телефонное сообщение) и различные импульсные последовательности [3]. При этом основными представлениями сигналов являются временное (зависимость амплитуды сигнала от времени) и спектральное (зависимость амплитуды или фазы гармонических составляющих сиг-

нала от частоты). Задача заключается в разработке моделей сигналов, которые позволили бы получить их временное представление в виде массивов значений (отсчетов), а спектральные характеристики (комплексный спектр сигнала) можно будет получить с использованием быстрого преобразования Фурье [3] с помощью выражения:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \times e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где $S(t)$ — массив временных значений сигнала. Для реализации этого преобразования в системе MathCAD воспользуемся встроенным быстрым Фурье-преобразованием в виде функции $Cfft(S(t))$ [2].

Рассмотрим методику построения модели телефонного сообщения в виде суммы нескольких гармонических составляющих, аппроксимирующих спектр реального телефонного сообщения (ТЛФС) и имеющих регулируемые случайные пределы отклонения амплитуд, частот и начальных фаз:

$$S_{ТЛФС} = \sum_{k=0}^{N_2-1} (Um_k + dU_k) \times \cos(2\pi(F_k + dF_k)t_j + \phi_k), \quad (2)$$

где F_k , Um_k — частоты и их амплитуды, аппроксимирующие спектр реального ТЛФС; dU_k , dF_k — случайные отклонения амплитуд и частот гармонических составляющих; ϕ_k — начальные фазовые сдвиги частот; N_2 — количество гармонических составляющих сигнала. Покажем, каким образом наша аналитическая модель (2) преобразуется в программный код MathCAD (рис. 1).

Поясним введенные идентификаторы и программный код модели. В строках 1–4 задаем амплитуды и частоты тринадцати гармонических составляющих телефонного сообщения, в строке 5 формируем отсчеты индексной переменной j — управляющей

```

Um1:=1,4   Um2:=1,6   Um3:=1,4   Um4:=1,1   Um5:=0,8   Um6:=0,7   Um7:=0,6
F1:=200    F2:=400    F3:=600    F4:=800    F5:=1000   F6:=1200   F7:=1400

Um8:=1,4   Um9:=1,6   Um10:=1,4   Um11:=1,1   Um12:=0,8   Um13:=0,7
F8:=200    F9:=400    F10:=600   F11:=800   F12:=1000   F13:=1200

j:=1..10000   tj:=j·10-6   fj:=j·102

N:=13   k:=1..N   um:=max(Um)

ϕk:=md(Umk)·π   dU:=runif(14, -0,2, 0,2)   dF:=runif(14, -10, 10)

Fk:=Fk+dFk   Umk:=Umk+dUk

Tj:=∑k=1N  $\frac{Um_k}{um} \cdot \cos(2\pi \cdot F_k \cdot t_j + \phi_k)$    R:=max(T)   stj:= $\frac{T_j}{R}$ 

SwT:=cfft(st)   vTj:=|SwTj   r:=max(vT)   bTj:= $\frac{vT_j}{r}$ 

```

Рис. 1. Программный код модели телефонного сообщения

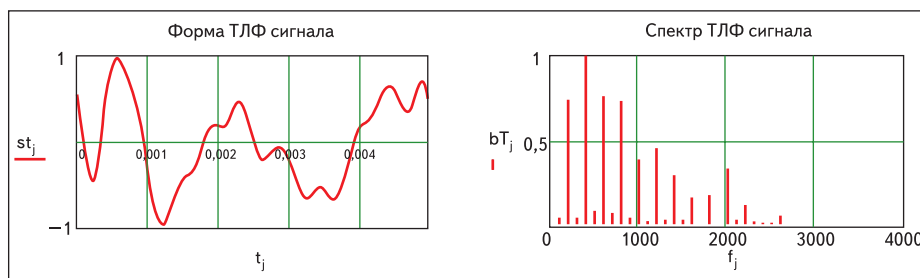


Рис. 2. Форма и спектр телефонного сигнала

переменной, которую будем использовать для индексации массивов, необходимых в модели, а также формируем отсчеты времени t_j и частоты f_j . В строке 6 задаем количество гармонических составляющих и индексную переменную k . В строке 7 формируем начальные фазовые сдвиги, отклонения амплитуд и частот, причем, если установить маркер в каком-либо из этих полей (выражений), то каждый раз при моделировании будут генерироваться новые значения параметров и это отразится на выходном сигнале. В строке 8 пересчитываем значения частот и амплитуд с учетом сгенерированных случайных сдвигов. В строке 9 формируем временное представление сигнала и выполняем его нормировку. В строке 10 рассчитываем комплексный спектр сигнала SwT , его модуль vT и выполняем нормировку амплитудно-частотного спектра (АЧС) результирующего сигнала, используя переменную r . Результат присваиваем идентификатору bT и строим график полученного массива от отсчетов частоты f_j . На рис. 2 показаны форма и спектр телефонного сигнала, полученные с помощью модели (2).

Итак, мы построили простую и удобную для управления параметрами модель первичного сигнала в виде суммы нескольких гармонических составляющих. Мы можем изменять амплитуды, частоты и начальные фазы каждой составляющей сигнала и видеть результаты изменений этих параметров на временном и спектральном представлении их суммы. Единственное, что осталось сделать — это записать в файл результат формирования временного представления сигнала для его использования в качестве входного сигнала в системе схемотехнического моделирования РЭУ. В CCM DesignLAB предусмотрен источник сигнала из файла, при этом данные в файле необходимо представить в следующем формате:

```
<отсчет времени 1> , <отсчет амплитуды 1>
<отсчет времени 2> , <отсчет амплитуды 2>
.....
<отсчет времени N> , <отсчет амплитуды N>.
```

Для того чтобы наш сигнал выглядел в файле подобным образом, добавим в модель следующий программный код:

```
i:=0...1 sig,:=if (i=0, t_j, st_j) WRITEPRN («sig.dat»):=sig
```

Поясним введенные обозначения. Мы сформировали массив всего из двух значений (0 и 1) для индексной переменной i , которая будет участвовать в формировании двумерного массива sig по правилу: если $i = 0$, то в j -элемент массива записываем отсчет времени t_j , если не равен нулю (равен 1) — то записываем отсчет сигнала st_j . Затем формируем файл с именем $sig.dat$, он будет размещаться в том же каталоге, что и наш файл с моделью. Следует также сказать о том, что для правильной записи результатов моделирования в файл, необходимо в программе MathCAD установить следующие значения системных параметров PRN File Settings: Precision (точность отображения) = 10, Column Width (ширина столбца) = 20.

Покажем теперь, как выполнить ввод и моделирование испытательной схемы для проверки модели сигнала в DesignLAB 8.0. Введем схему, показанную на рис. 3.

В качестве источника сигнала воспользуемся компонентом VPWL_FILE (источник на-

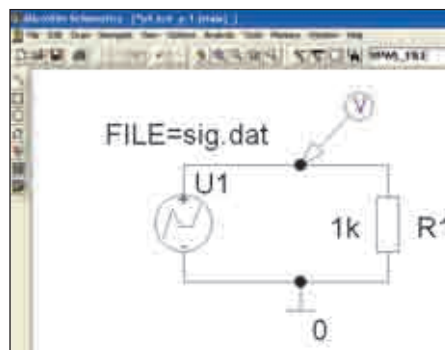


Рис. 3. Испытательная схема с источником сигнала из файла

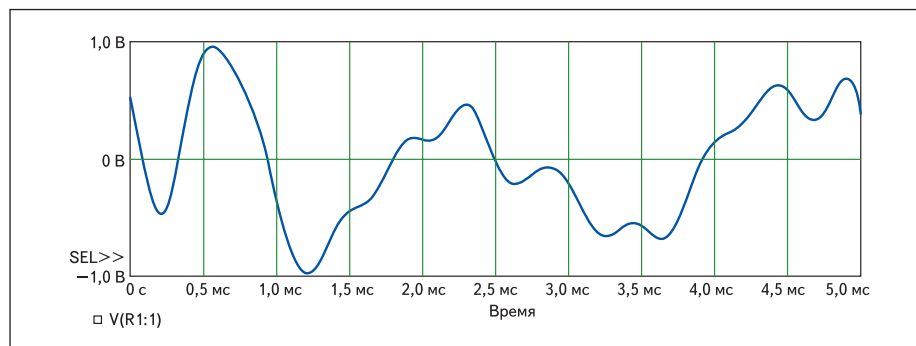


Рис. 4. Результаты моделирования источника сигнала в системе DesignLAB

пряжения, заданный в файле) и установим значение его атрибута File=sig.dat. Сохраним собранную схему, поместив в папку со схемой файл $sig.dat$, зададим параметры директивы временного анализа и выполним моделирование. В окне программы Probe системы DesignLAB мы увидим точно такой же сигнал, который первоначально был создан нами с помощью программы MathCAD (рис. 4).

Разработаем модель первичного сигнала в виде последовательности прямоугольных импульсов с управляющими параметрами длительности импульса, периода следования импульсов и числа импульсов в моделируемом фрагменте. Хотя подобного рода сигналы можно сгенерировать и с помощью имеющихся в CCM источников сигналов, модель такого сигнала понадобится нам для создания источников сигналов с дискретной модуляцией, которых, к сожалению, в системе DesignLAB нет. Алгоритм формирования последовательности импульсов N_u с заданной длительностью t_u и периодом следования T аналитически можно записать с помощью условной функции вида:

$$y(x) = f \left\{ \begin{array}{l} c1 \leq x \leq c2, \\ d1, \\ d2 \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $c1, c2$ — значения переменной x , определяющие границы условия; $d1$ — значение, принимаемое функцией при выполнении условия; $d2$ — значение, принимаемое функцией при невыполнении условия. Тогда, представив импульсную последовательность в виде суммы одиночных импульсов, смещенных друг относительно друга по оси времени на длительность импульса и периода их следования $t_u \times n + T \times n$, получим алгоритм формирования последовательности импульсов с заданной скважностью и длительностью импульсов:

$$I1(t_i) = \sum_{n=0}^{N_u-1} F \left[\begin{array}{l} t_3 + T \times n \leq t_i < t_3 + t_u \times n + T \times n, \\ 1, \\ 0 \end{array} \right], \quad (4)$$

где t_3 — длительность интервала задержки последовательности импульсов относительно момента времени $t_i = 0$; N_u — количество импульсов

$$I2(t_i) = \sum_{n=0}^{N_u-1} F \begin{bmatrix} T_n/N_u \times n \leq t_i < t_3 + T_n/N_u \times (n+1), \\ M_n, \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

в последовательности: t_u , T — длительность и период следования импульсов для заданной скважности $q=T/t_u$. В выражении (4) формируется массив значений Π , в котором для каждого i -го отсчета определено значение, откладываемое по оси ординат: 1 — если отсчет времени t_i находится в пределах длительности импульса (удовлетворяется условие), и 0 — во всех остальных случаях (условие не удовлетворяется). Просуммировав полученные таким способом одиночные импульсы, смещенные по оси времени на интервал Tn , получим требуемую последовательность импульсов с варьируемыми значениями длительности и периодом следования.

На языке MathCAD выражение (3) можно ввести с помощью условной функции $\text{if}(\text{arg}, y1, y2)$ [2]. Тогда программа для формирования временного представления импульсной последовательности может быть записана следующим образом. Задаем начальные значения параметров ti — длительность импульса, T — период следования импульсов, ni — количество импульсов в пачке:

$$ti := 10 \times 10^{-3} \quad ni := 5 \quad T := 40 \times 10^{-3}.$$

Формируем массивы управляющей переменной j , отсчетов времени t_j и частоты f_j , отсчетов импульсной последовательности a_j в соответствии с выражением (4):

$$j := 0 \dots 10000 \quad t_j := j \times 10^{-4} \quad f_j := j \\ a_j := \sum_{n=0}^{ni-1} \text{if}(T \times n \leq t_j \leq T \times n + ti, 1, 0).$$

Для генерирования дискретных сигналов с кодовым формированием импульсов воспользуемся все тем же принципом суммирования элементарных импульсов, но сдвинутых друг относительно друга по оси времени на длительность единичной посылки $T_n/N_u \times n$. Для этого сформируем кодовый массив $M = (m_0, m_1, m_2 \dots m_{N_u-1})$, в котором число элементов равно числу единичных импульсов. Так, например, для семиэлементного произвольного кода массив можно представить в виде $M = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$. Тогда алгоритм формирования кодовой посылки импульсов с использованием (4) запишется в виде выражения (5), где t_3 — длительность интервала задержки кодовой посылки относительно момента времени $t_i = 0$; N_u — количество импульсов в посылке; T_n — длительность кодовой посылки.

Для получения последовательности, состоящей из нескольких посылок, разделенных временными промежутками, просум-

мируем сдвинутые по времени посылки на длительность элементарного импульса и периода повторения посылки $T_n/N_u \times n + P \times k$. Тогда алгоритм (5) следует записать в виде (6), где t_3 — длительность интервала задержки кодовой посылки относительно момента времени $t_i = 0$; N_u — количество импульсов в посылке; T_n — длительность кодовой посылки; N_n — количество посылок в последовательности; P — период повторения посылки.

Приступим к созданию модели первичного сигнала в виде импульсной последовательности с кодовым формированием единичных посылок. Задаем начальные значения параметров Tc — длительность пачки импульсов, Per — период следования пачек импульсов, Kc — количество импульсов в пачке и m_k — значения единичных посылок:

- длительность пачки импульсов

$$Tc = 10 \times 10^{-3};$$

- период следования пачки импульсов/количество пачек

$$Per = 20 \times 10^{-3}/N = 2;$$

- кодовая последовательность

$$Kc = 5, m_0 = 1, m_1 = 0, m_2 = 1, \\ m_3 = 0, m_4 = 1, m_5 = 1.$$

Формируем массивы управляющей переменной j , отсчетов времени t_j и частоты f_j , отсчетов импульсной последовательности a_j в соответствии с выражением (6), отсчетов одиночного импульса $a1_j$ длительностью Tc и отсчетов одиночного импульса $a2_j$ длительностью Tc/Kc , которые являются вспомогательными при анализе спектра последовательности:

$$j := 0 \dots 10000 \quad t_j := j \times 10^{-4} \\ a_j := \sum_{k=0}^{N} \sum_{n=0}^{Kc-1} \text{if}(Tc \times n/Kc + Per \times k < t_j \leq \\ \leq Tc/Kc + Tc \times n/Kc + Per \times k, m_n, 0)$$

$$f_j := j \quad a1_j := \text{if}(0 < t_j \leq Tc, 1, 0) \\ a2_j := \text{if}(0 < t_j \leq Tc/Kc, 1, 0).$$

В результате получим график временного представления импульсной последовательности с кодовым формированием единичных посылок, показанный на рис. 5.

Спектры импульсной последовательности b_j с кодовым формированием единичных посылок, одиночных импульсов $b1_j$ и $b2_j$ с длительностями Tc и Tc/Kc соответственно показаны на рис. 6.

Используя рассмотренную методику разработки моделей сигналов в программной

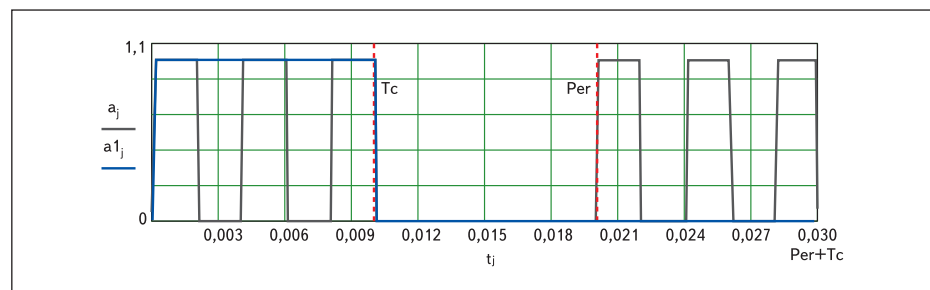


Рис. 5. Временное представление импульсной последовательности с кодовым формированием единичных посылок

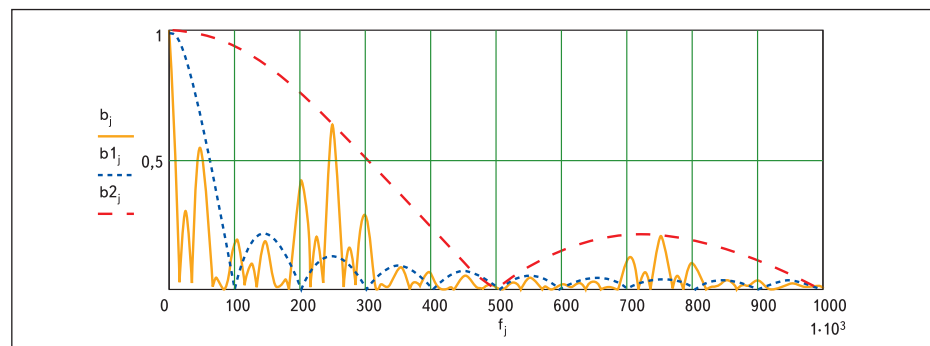


Рис. 6. Спектры одиночных импульсов и последовательности с кодовым формированием единичных посылок

среде MathCAD, читатель самостоятельно сможет создать источники первичных сигналов для моделирования с их помощью различных радиоэлектронных устройств.

В следующих статьях будет показано, каким образом можно с использованием рассмотренного подхода разработать модели сигналов с аналоговой и дискретной модуляцией, а также модели некоторых сложных сигналов. ■

Литература

1. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: Солон, 1999.
2. Saffe R. C. Random Signals for Engineers using MATLAB and MathCAD. Springer — Verlag, 2000.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.