

# Разработка моделей СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

Роман АНТИПЕНСКИЙ,  
к. т. н.  
antic@vmail.ru

**В статье рассматривается методика разработки моделей сложных сигналов, предназначенных для использования в системах схемотехнического моделирования радиоэлектронных устройств в качестве источников входных колебаний. Материал статьи может оказаться полезным разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, функционирующей с использованием подобных сигналов.**

В предыдущей статье «Разработка моделей сигналов с дискретной модуляцией» [1] автор показал методику построения моделей перечисленных сигналов в программной среде MathCAD и последующего их использования в системе схемотехнического моделирования DesignLAB. В настоящей статье мы продолжим разработку моделей сложных сигналов, основываясь на предложенной методике.

С целью повышения помехозащищенности информационных и измерительных радиосистем применяют сложные сигналы, у которых база сигнала (произведение длительности на ширину спектра) значительно больше единицы [2]:

$$B = \Delta T_c \times \Delta F_c \gg 1. \quad (1)$$

В качестве примеров сложных сигналов рассмотрим радиоимпульсы с дополнительной фазовой и частотной модуляцией. При этом наряду с временным и спектральным представлениями сигналов необходимо будет моделировать их автокорреляционную функцию, воспользовавшись полученным в [3] выражением для дискретизированных сигналов (представленных в ЭВМ дискретными отсчетами):

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} ICFFT(W(f) \times e^{j2\pi f t_c}), \quad (2)$$

где  $ICFFT()$  — обратное альтернативное быстрое преобразование Фурье [4],  $W(f)$  — энергетический спектр сигнала,  $T_c$  — длительность импульса.

## Модель радиоимпульса с линейной частотной модуляцией

Аналитическое представление ЛЧМ-радиоимпульса, с которого мы начнем разработку модели, имеет следующий вид [2]:

$$S_w := \text{cfft}(d) \quad v_j := (|S_w_j|)^2 \quad r := \max(v) \quad b_j := \frac{v_j}{r} \quad \text{Base} := T_c \cdot \Delta f \quad \text{Base} = 10$$

Листинг 5

$$s(t) = S_m \cos(\omega_0 t + \beta t^2/2), \quad |t| \leq \frac{t_u}{2}, \quad (3)$$

где  $S_m$  — амплитуда радиоимпульса,  $\omega_0$  — круговая несущая частота,  $\beta = 2\pi\Delta f/T_c$  — скорость изменения частоты внутри импульса,  $\Delta f$  — девиация частоты.

Создав новый файл в программной среде MathCAD, введем дискретные отсчеты времени и частоты:

$$j := 1..10000 \quad t_j := j \cdot 10^{-6} \quad f_j := j \cdot 10^3$$

Листинг 1

и зададим параметры модели — длительность импульса, девиацию частоты внутри импульса и несущую частоту:

$$T_c := 5 \cdot 10^{-4} \quad \Delta f := 20 \cdot 10^3 \quad f_0 := 50 \cdot 10^3$$

Листинг 2

Нам необходимо сформировать ЛЧМ-радиоимпульс заданной длительности, поэтому для формирования временной формы сигнала можно воспользоваться условной функцией вида:

$$y(x) = f \begin{cases} c1 \leq x \leq c2, \\ d1, \\ d2 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $c1$ ,  $c2$  — значения переменной  $x$ , определяющие границы условия;  $d1$  — значение, принимаемое функцией при выполнении условия;  $d2$  — значение, принимаемое функцией при невыполнении условия. Обозначив идентификатором  $a_j$  массив отсчетов первичного импульса заданной длительности, можем записать выражение для его формиро-

вания в программной среде MathCAD с использованием функции (4):

$$a_j := \text{if}(0 \leq t_j \leq T_c, 1, 0).$$

Листинг 3

Введя выражение для скорости изменения частоты внутри импульса, можем записать формулу для расчета массива отсчетов ЛЧМ-радиоимпульса:

$$\beta := 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta f}{T_c} \quad d_j := a_j \cdot \cos \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( f_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot t_j + \beta \cdot \frac{(t_j)^2}{2} \right]$$

Листинг 4

Покажем теперь, каким образом можно получить энергетический спектр ЛЧМ-радиоимпульса и построить его автокорреляционную функцию. Для расчета энергетического спектра воспользуемся функцией быстрого преобразования Фурье, передав ей в качестве входного параметра массив отсчетов сигнала, и возведем в квадрат модуль возвращаемого этой функцией результата. Программный код этих операций на языке MathCAD можно записать в следующем виде (листинг 5).

Здесь же мы выполнили нормировку энергетического спектра ЛЧМ-радиоимпульса и ввели формулу для расчета базы сигнала.

Для расчета массива отсчетов автокорреляционной функции ЛЧМ-радиоимпульса воспользуемся выражением (2), выделим реальную часть полученного комплексного массива с помощью функции  $\text{Re}()$  [4] и выполним нормировку его значений. Программный код этих операций запишем следующим образом (листинг 6).

Для визуализации полученных массивов временного представления ЛЧМ-радиоимпульса, его энергетического спектра и авто-

$$Q_j := (|S_w_j|)^2 \cdot \exp(\sqrt{-1} \cdot T_c \cdot f_j \cdot 2 \cdot \pi) \quad B := \text{Re}(\text{icfft}(Q)) \quad H := \max(B) \quad KF_j := \frac{B_j}{H}$$

Листинг 6

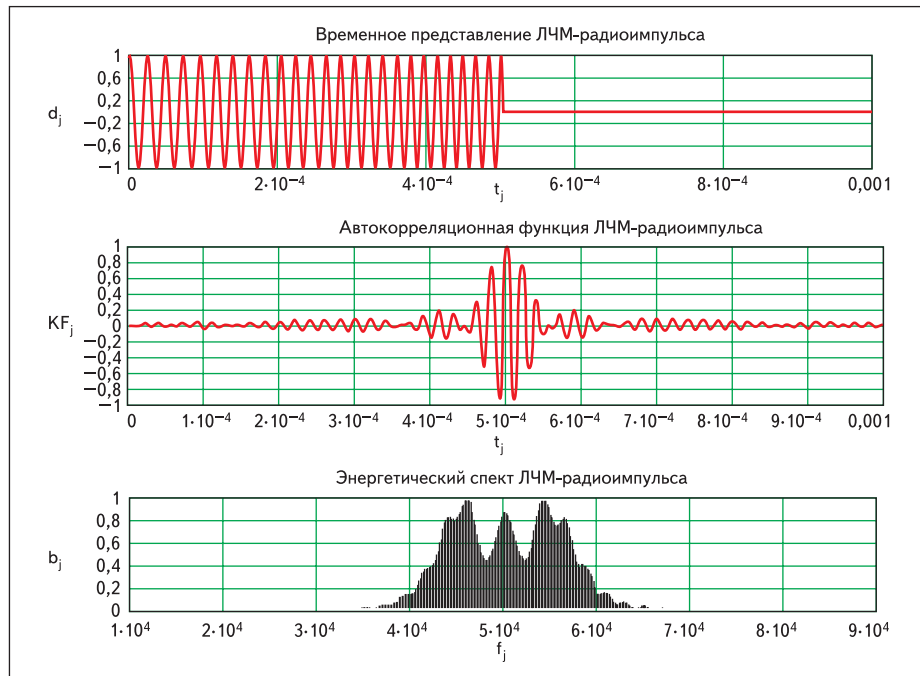


Рис. 1. Результаты моделирования ЛЧМ- радиоимпульса с параметрами  $T_c = 0,5$  мс,  $\Delta f = 20$  кГц,  $f_0 = 50$  кГц

корреляционной функции разместим в модели три графика. После установки пределов отображения на горизонтальных осях графиков должен получиться результат моделирования ЛЧМ-радиоимпульса, представленный на рис. 1.

Рассмотрим, каким образом теперь передать результаты моделирования ЛЧМ-сигнала в систему схемотехнического моделирования DesignLAB (или последнюю версию этого пакета OrCAD). В этих системах 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, допишем в нашу модель следующий программный код:

```
i:=0..1 sig_{i}:=if(i=0, t_{j}, s_{j}) WRITEPRN(«sig.dat»):=sig
```

#### Листинг 7

Поясним введенные обозначения. Индексная переменная  $i$  участвует в формировании двумерного массива  $sig$  по правилу: если  $i = 0$ , то в  $[0, j]$  элемент массива записываем отсчет времени  $t_j$ , если не равен нулю (равен 1) — то в элемент с индексами  $[1, j]$  записываем отсчет сигнала  $s_j$ . 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 пара-

метров PRN File Settings: Precision (точность отображения) = 10, Column Width (ширина столбца) = 20.

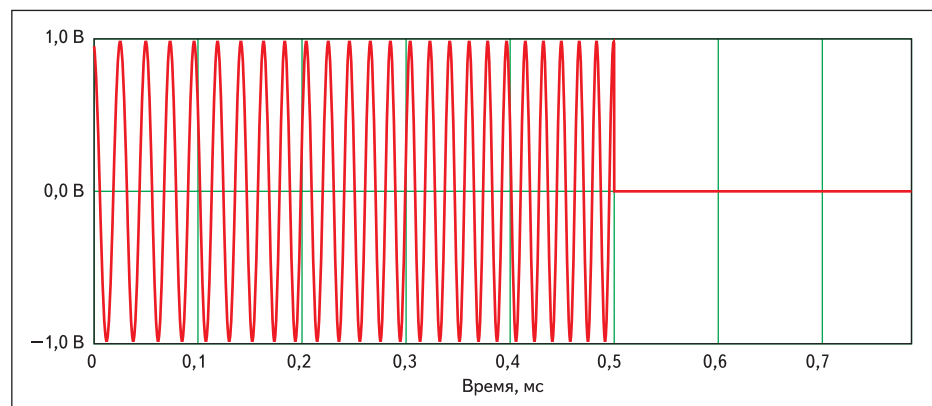


Рис. 3. ЛЧМ- радиоимпульс на выходе источника сигнала в системе схемотехнического моделирования DesignLAB

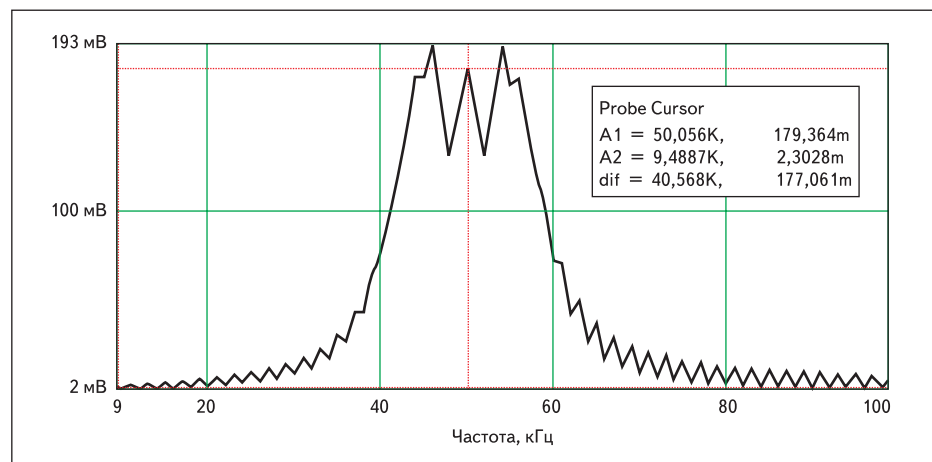


Рис. 4. Амплитудный спектр ЛЧМ-радиоимпульса в системе схемотехнического моделирования DesignLAB

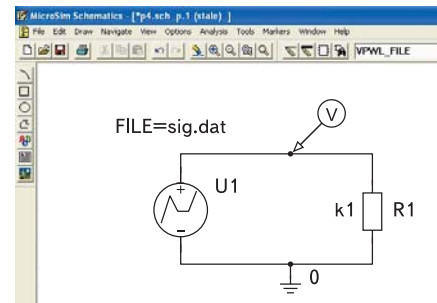


Рис. 2. Испытательная схема с источником сигнала из файла

Покажем теперь, как выполнить ввод и моделирование испытательной схемы для проверки модели сигнала в DesignLAB 8.0. Введем схему, показанную на рис. 2.

В качестве источника сигнала воспользуемся компонентом VPWL\_FILE [5] (источник напряжения, 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. 3).

$$I1(t_j, n) := \cos \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( f_{c0} - \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot \left( t_j - \frac{T_c \cdot n}{7} \right) + \beta \cdot \frac{\left( t_j - \frac{T_c \cdot n}{7} \right)^2}{2} \right]$$

$$I2(t_j, n) := \cos \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( f_{c0} + \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot \left( t_j - \frac{T_c \cdot n}{7} \right) - \beta \cdot \frac{\left( t_j - \frac{T_c \cdot n}{7} \right)^2}{2} \right]$$

$$LCM_j := \sum_{n=0}^{N-1} \text{if} \left( \frac{T_c \cdot n}{7} < t_j \leq \frac{T_c}{7} + \frac{T_c \cdot n}{7}, \text{if} (m_n = 1, I1(t_j, n), I2(t_j, n)), 0 \right)$$

Рис. 5. Фрагмент программного кода модели семиэлементного сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением

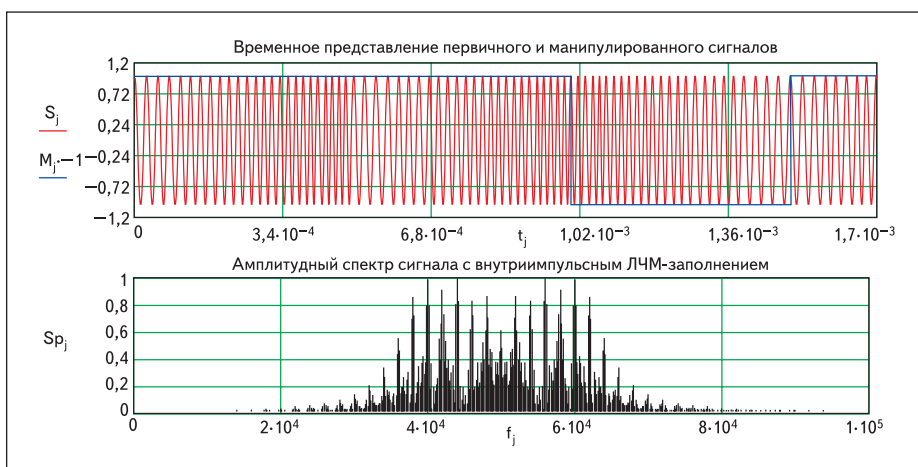


Рис. 6. Результаты моделирования сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением

$$S1_j := \cos \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( f_{c0} - \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot t_j + \beta \cdot \frac{(t_j)^2}{2} \right] \quad S0_j := \cos \left[ 2 \cdot \pi \cdot \left( f_{c0} + \frac{\Delta f}{2} \right) \cdot t_j - \beta \cdot \frac{(t_j)^2}{2} \right]$$

Листинг 8

Убедиться в соответствии спектральных характеристик исходного ЛЧМ-радиоимпульса, созданного в программной среде MathCAD, и сигнала из внешнего источника в системе схемотехнического моделирования DesignLAB можно, выполнив быстрое преобразование Фурье (рис. 4).

### Модель сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением

Разработаем модель сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением для посылки, состоящей из семи элементов. Закон манипуляции такого сигнала будет определять направление изменения частоты внутри эле-

ментарного импульса. Тогда для единичной и нулевой посылки можно записать следующие выражения, формирующие их временные представления (листинг 8).

Параметр  $\beta$  в таком сигнале должен рассчитываться для элементарного импульса, поэтому в нашей модели следует записать выражение:

$$\beta = (2\pi \times \Delta f \times Ni) / T_c,$$

где  $T_c$  — длительность сигнала (пачки элементарных импульсов),  $Ni$  — количество импульсов в пачке.

Для сдвига элементарных посылок по времени так, чтобы они следовали одна за другой, необходимо будет скорректировать вре-

```
длительность пачки      девиация      несущая частота
Tc := 3.5·10-3          Δf := 30·103          fc0 := 50·103
количество импульсов в пачке (max=7)  N := 7
m0 := 1  m1 := 1  m2 := 0  m3 := 1  m4 := 1  m5 := 1  m6 := 1
```

Листинг 9

мя формирования посылок с помощью выражения:

$$t_j - (T_c \times n) / Ni,$$

где  $n$  — номер импульса в пачке. Затем воспользуемся операцией суммирования сдвинутых по времени элементарных импульсов для формирования результирующего сигнала. С учетом рассмотренных действий выражение для формирования семиэлементного сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением можно записать в виде, который представлен на рис. 5.

Перед этим выражением нам необходимо задать начальные параметры сигнала: длительность пачки  $T_c$ , число импульсов в пачке  $N$  и значения посылок  $m_n$ . В остальном программный код модели такого сигнала не будет отличаться от рассмотренной выше модели ЛЧМ-радиоимпульса. На рис. 6 представлены результаты моделирования сигнала с внутриимпульсным ЛЧМ-заполнением для следующих параметров (листинг 9).

### Модель ЛЧМ-радиоимпульса с прямоугольным заполнением

В настоящее время в радиотехнике все большее применение находят сложные сигналы на основе ЛЧМ-радиоимпульсов с прямоугольным заполнением. Спектры таких сигналов содержат нечетные гармоники, из которых возможно извлечение дополнительной информации об объекте радиотехнической разведки. Модель такого сигнала можно получить на основе следующего аналитического выражения [6]:

$$S_{\Pi}(t) = \text{sgn} S_C(t) = U_m \times \text{sgn} \left[ \cos \left( 2\pi f_0 t + \frac{2\pi \Delta f}{T_c} t^2 \right) \right], \quad (5)$$

где  $S_C$  — временное представление ЛЧМ-сигнала с синусоидальным заполнением,  $\text{sgn}(x)$  — функция знака, определяемая следующим образом:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0, \\ 0 & x = 0, \\ -1 & x < 0. \end{cases} \quad (6)$$

С учетом рассмотренного способа формирования ЛЧМ-сигнала с прямоугольным заполнением можем дополнить предыдущую модель следующим программным кодом:

```
di_j := if(dj <= 0, -1, 1)  di_j := if(t_j > (Tc * N / 7), 0, di_j)
Swi := fft(di)  vi_j := |Swi_j|  ri := max(vi)  bi_j := vi_j / pi
```

Листинг 10

В верхней строке мы формируем ЛЧМ-сигнал с прямоугольным заполнением в соот-

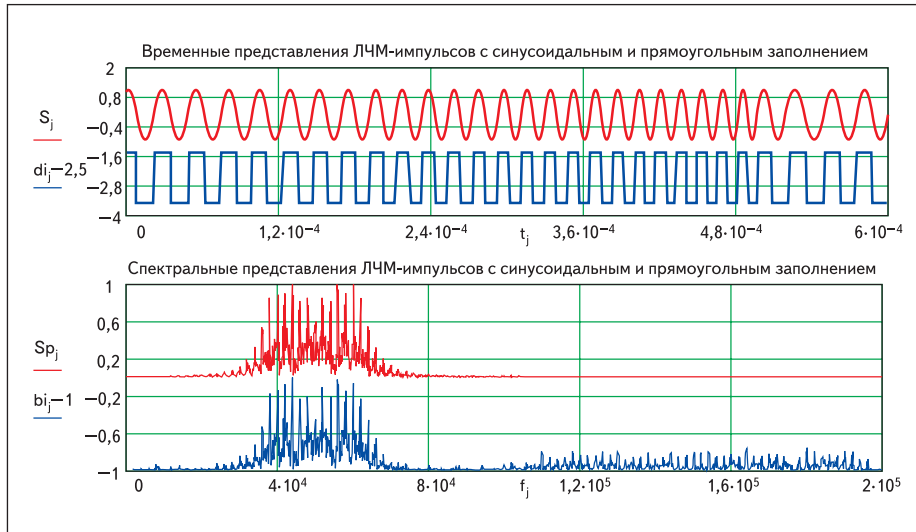


Рис. 7. Результаты моделирования ЛЧМ-радиоимпульсов с синусоидальным и прямоугольным заполнением

ветствии с выражением (6), затем рассчитываем и нормируем его амплитудный спектр. На рис. 7 представлены результаты моделирования ЛЧМ-радиоимпульсов с синусоидальным и прямоугольным заполнением.

### Модель последовательности радиоимпульсов с фазокодовой манипуляцией

К сложным сигналам относят также радиоимпульсы с фазокодовой манипуляцией (ФКМ), которые обеспечивают повышение помехоустойчивости приема и скрытности при излучении таких сигналов. ФКМ-колебание можно представить последовательностью импульсов с длительностью  $\tau_0 = \tau_u/m$ , амплитудой  $S_m$  и фазой  $\omega_0 t + \varphi(t)$ , каждый из которых определяется следующей аналитической записью:

$$S(t) = \begin{cases} S_m \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau, \\ 0 & \text{при } 0 > t > \tau_u, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\varphi(t)$  — закон изменения фазы. При этом в качестве первичных сигналов, как правило, используются сигналы с кодом Баркера, так как в их автокорреляционных функциях реализуется наименьший уровень боковых лепестков.

Воспользуемся алгоритмом расчета временного представления первичной импульсной последовательности, который достаточно подробно рассмотрен в [1], в виде нескольких пачек с кодовым формированием

$$I3(t_i) = \sum_{k=0}^{N_u-1} \sum_{n=0}^{N_u-1} \begin{cases} t_3 + \frac{T_n}{N_u} \times n + P \times k \leq t_i < t_3 + \frac{T_n}{N_u} \times (n+1) + P \times k, \\ 0 \end{cases} \quad (8)$$

элементарных посылок (8), 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 посылок,  $M_n$  — значение кодовой посылки (0 или 1). Для реализации модели ФКМ-радиоимпульса в программной среде MathCAD зададим значения варьируемых параметров модели (листинг 11).

Заметим, что в качестве первичного сигнала мы использовали семиэлементный код Баркера, имеющий наименьший уровень боковых лепестков автокорреляционной функции. Убедиться в этом заключении читатель сможет после создания модели и выполнения моделирования с другими значениями пара-

метров последовательности  $m_k$ . Покажем оставшуюся часть программного кода модели ФКМ-радиоимпульса, а затем поясним введенные идентификаторы (рис. 8).

В строке 1 задаем число отсчетов, формируем массивы времени и частоты, задаем несущую частоту импульса, равную 50 кГц. Следует сказать, что некоторые параметры модели, такие как несущая частота, длительность пачки импульсов и другие, выбраны исходя из того, чтобы читатель смог на рисунках отчетливо увидеть моменты перехода фазы от посылки к посылке. При использовании источника сигнала для моделирования радиоэлектронных устройств читатель может задать необходимые ему значения этих параметров, не забыв при этом про взаимосвязь числа отсчетов  $N$ , временного и частотного массивов модели. Во второй строке программного кода формируем первичную последовательность импульсов  $a_j$ , в строке 3 — ФКМ-радиоимпульс с использованием массива  $a_j$ . В строках 4–5 рассчитываем спектр сигнала и его автокорреляционную функцию, в строке 6 записываем временное представление ФКМ-радиоимпульса в файл для использования в качестве источника внешнего сигнала. На рис. 9 показаны результаты моделирования ФКМ-радиоимпульса с использованием разработанной модели.

Разработанный нами алгоритм позволяет формировать не только одиночный ФКМ-радиоимпульс, но и последовательность радиоимпульсов с количеством пачек и периодом их следования, которые могут изменяться. Применяя рассмотренные в статье алгоритмы формирования сложных сигналов, читатель сможет самостоятельно создавать (или модифицировать приводимые) модели ЛЧМ- и ФКМ-радиоимпульсов (сигналов) и исполь-

```

j:=0..10000   t_j:=j*10^-6   f_j:=j*10^2   f_0:=50*10^3
a_j:=sum_{k=0}^N sum_{n=0}^{Kc-1} if((Tc*n/Kc + Per*k < t_j <= Tc*n/Kc + Tc*n/Kc + Per*k, m_n, 0)
d_j:=sum_{k=0}^N sum_{n=0}^{Kc-1} if((Tc*n/Kc + Per*k < t_j <= Tc*n/Kc + Tc*n/Kc + Per*k, if(a_j > 0, cos(2*pi*f_0*t_j), cos(2*pi*f_0*t_j + 3,14)), 0)
Sw:=cfft(d)   v_j:=|Sw_j|   r:=max(v)   b_j:=v_j/r
Q_j:=(|Sw_j|)^2*exp(sqrt(-1)*Tc*f_j*2*pi)   B:=Re(iefft(Q))   H:=max(B)   KF_j:=B_j/H
i:=0..1   sig_j,i:=if(i=0,t_j,d_j)   WRITEPRN("sig.dat"):=sig
    
```

Рис. 8. Программный код модели ФКМ-радиоимпульса

```

Длительность пачки импульсов   Период следования пачки импульсов
                                количество пачек
Tc := 1*10^-3                   Per := 4*10^-3   N := 0
Кодовая последовательность
Kc := 7
m_0 := 1   m_1 := 1   m_2 := 1   m_3 := 0   m_4 := 0   m_5 := 1   m_6 := 0
Листинг 11
    
```

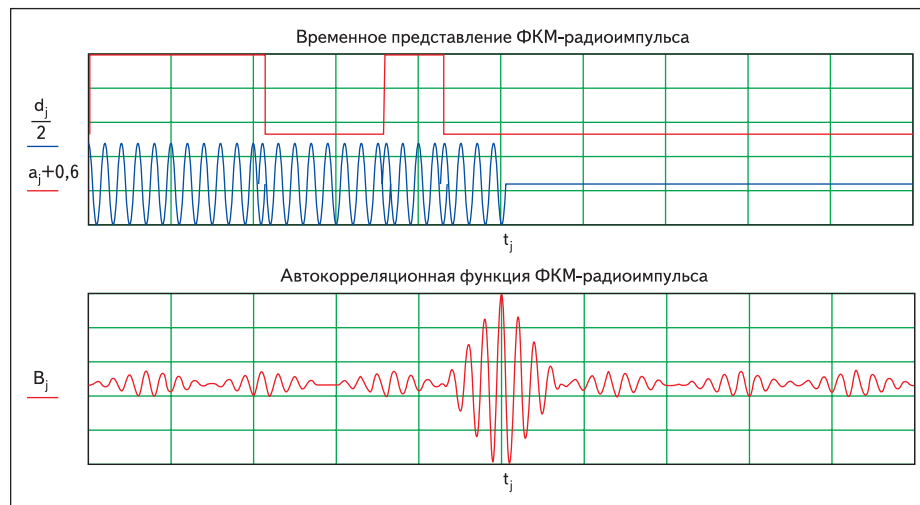


Рис. 9. Результаты моделирования ФКМ радиоимпульса с семиэлементным кодом Баркера

зывать их для моделирования различных радиоэлектронных устройств. В следующей статье будет рассмотрена методика разработки моделей сигналов с импульсной модуляцией.

Модели сигналов, рассмотренные в статье, можно посмотреть на сайтах:

- [http://finestreet.ru/magazine/compitech/FKM\\_signal.mcd](http://finestreet.ru/magazine/compitech/FKM_signal.mcd);

- [http://finestreet.ru/magazine/compitech/LCHM\\_7.mcd](http://finestreet.ru/magazine/compitech/LCHM_7.mcd).

Для их открытия и моделирования необходимо наличие установленной на ПК системы MathCAD 2001.

#### Литература

1. Антипенский Р. В. Разработка моделей сигналов с дискретной модуляцией // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь. 1986.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер. 2003.
4. Richard C. Saffe. Random Signals for Engineers using MATLAB and Mathcad. Springer — Verlag, 2000.
5. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. М.: Солон. 1999.
6. Абрамов В. С. Обнаружение-измерение пачечных ЛЧМ-сигналов в многоцелевых ситуациях // Радиотехника. 1998. № 2. Журнал в журнале: «Радиосистемы». Вып. 27. «Конфликтно-устойчивые РЭС». № 4.