

Моделирование источников сложных сигналов

Роман Антипенский (г. Воронеж)

В статье рассматривается методика разработки в программной среде MathCAD источников сложных сигналов, предназначенных для систем схемотехнического моделирования радиоэлектронных устройств.

В статье [1] была описана методика разработки моделей дискретных сигналов в программной среде MathCAD и последующего их использования в системе схемотехнического моделирования DesignLAB. В настоящей статье мы продолжим разработку источников сложных сигналов, основываясь на предложенной методике.

Для повышения помехозащищённости информационных и измерительных радиосистем широко используются сложные сигналы, у которых база сигнала (произведение длительности на ширину спектра) значительно больше единицы [2]:

$$B = \Delta f_c \Delta t_c \gg 1. \quad (1)$$

В качестве примеров сложных сигналов рассмотрим радиоимпульсы с дополнительной фазовой и частотной модуляцией. При этом, наряду с временным и спектральным представлениями сигналов, необходимо смоделировать автокорреляционную функцию таких сигналов, воспользовавшись выражением для дискретных отсчётов [3]:

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

где $ICFFT()$ – обратное альтернативное БПФ [4], $W(f)$ – энергетический спектр сигнала, T_c – длительность импульса.

Модель радиоимпульса с линейной частотной модуляцией

Аналитическое представление ЛЧМ-радиоимпульса имеет следующий вид [2]:

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

где S_m – амплитуда радиоимпульса, ω_0 – круговая несущая частота, $\beta = 2\pi\Delta f/T_c$ –

скорость изменения частоты внутри импульса, Δf – девиация частоты.

Введём дискретные отсчёты времени и частоты:

$$j := 1 \dots 10\,000 \quad t_j := j \times 10^{-6} \quad f_j := j \times 10^3$$

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

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

Нам необходимо сформировать импульс заданной длительности, поэтому воспользуемся 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 отсчётов первичного импульса заданной длительности, можно записать выражение для его формирования в программной среде MathCAD с использованием функции (4):

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

С учётом выражения для скорости изменения частоты внутри импульса можно записать формулу для расчёта массива отсчётов ЛЧМ-радиоимпульса:

$$\beta := 2\pi \frac{\Delta f}{T_c},$$

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

Покажем теперь, каким образом можно получить энергетический

спектр ЛЧМ-радиоимпульса и построить его автокорреляционную функцию. Для расчёта энергетического спектра воспользуемся функцией быстрого преобразования Фурье, передав ей в качестве входного параметра массив отсчётов сигнала, и введём в квадрат модуль возвращаемого этой функцией результата.

Программный код этих операций на языке MathCAD, включая нормировку энергетического спектра ЛЧМ и расчёт базы сигнала, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} Sw &:= \text{cfft}(d) & v_j &:= (|Sw_j|)^2 & r &:= \max(v) \\ b_j &:= v_j/r & \text{Base} &:= T_c \Delta f & \text{Base} &:= 10 \end{aligned}$$

Для расчёта массива отсчётов автокорреляционной функции ЛЧМ-радиоимпульса воспользуемся выражением (2), выделим реальную часть полученного комплексного массива с помощью функции $Re()$ [4] и выполним нормировку его значений. Программный код этих операций выглядит следующим образом:

$$Q_j := (|Sw_j|)^2 \exp(\sqrt{-1} T_c f_j \times 2\pi)$$

$$B := \text{Re}(\text{icfft}(Q))$$

$$\Pi := \max(B)$$

$$KF_j := \frac{B_j}{\Pi}$$

Для визуализации полученных массивов временного представления ЛЧМ-радиоимпульса, его энергетического спектра и автокорреляционной функции разместим в модели три графика. После установки пределов отображения на горизонтальных осях графиков получается результат моделирования ЛЧМ-радиоимпульса, представленный на рисунке 1.

Рассмотрим, каким образом можно 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:

<отсчёт времени 1> ,
<отсчёт амплитуды 1>

<отсчёт времени 2> ,
<отсчёт амплитуды 2>

...

<отсчёт времени N> ,
<отсчёт амплитуды N>.

Чтобы сигнал выглядел в файле подобным образом, допишем в нашу модель следующий программный код:

```
I:= 0...1 sigj,i:= if(I = 0, tj, sj)
WRITEPRN("sig.dat"):= sig
```

Поясним введённые обозначения. Индексная переменная *i* участвует в формировании двумерного массива *sig* по правилу: если *i* = 0, то в [0, *j*] элемент массива записываем отсчёт времени *t_j*, если не равен нулю (равен 1), то в элемент с индексами [1, *j*] записываем отсчёт сигнала *s_j*. Затем формируем файл с именем sig.dat – он будет размещаться в том же каталоге, что и наш файл с моделью. Следует отметить, 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. Введём схему, показанную на рисунке 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

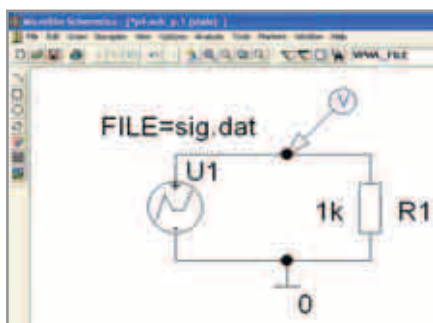


Рис. 2. Испытательная схема с источником сигнала из файла

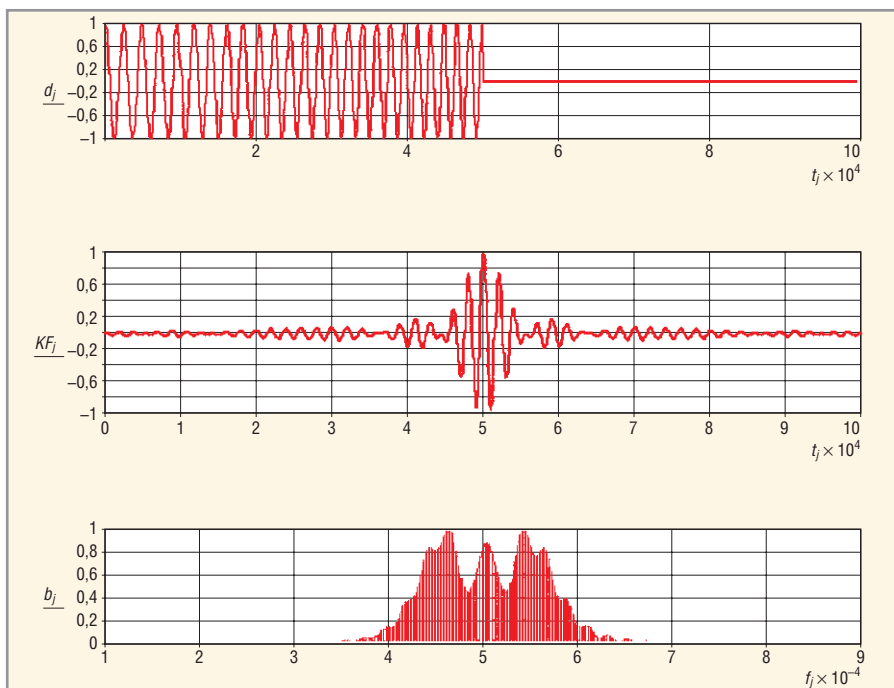


Рис. 1. Результаты моделирования ЛЧМ-радиоимпульса с параметрами $T_c = 0,5$ мс, $\Delta f = 20$ кГц, $f_0 = 50$ кГц

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 (см. рис. 3).

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 БПФ нажатием кнопки FFT (см. 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 из-

менения частоты внутри элементарного импульса. Тогда для единичной и нулевой посылки можно записать следующие выражения, формирующие их временные представления:

$$S1_j := \cos \left[2\pi \left(fc_0 - \frac{\Delta f}{2} \right) t_j + \beta \frac{t_j^2}{2} \right]$$

$$S0_j := \cos \left[2\pi \left(fc_0 + \frac{\Delta f}{2} \right) t_j - \beta \frac{t_j^2}{2} \right]$$

Параметр β в таком сигнале должен рассчитываться для элементарного импульса, поэтому в нашей модели следует записать выражение: $\beta = 2\pi\Delta f N_i / T_c$, где T_c – длительность сигнала (пачки элементарных импульсов), N_i – количество импульсов в пачке.

Для последовательного распределения элементарных посылок во времени необходимо скорректировать время формирования посылок с по-

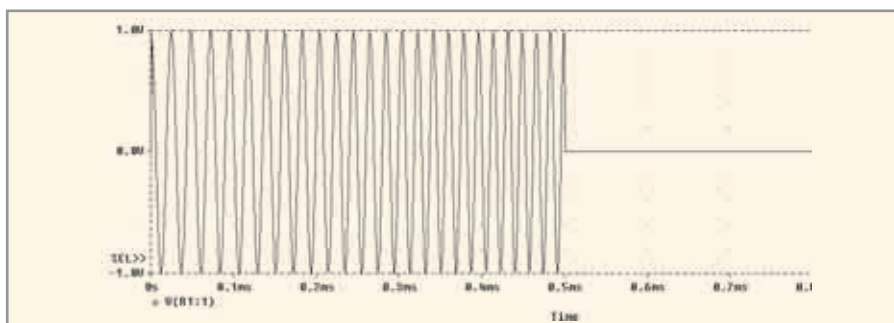


Рис. 3. ЛЧМ-радиоимпульс на выходе источника сигнала в системе схемотехнического моделирования DesignLAB

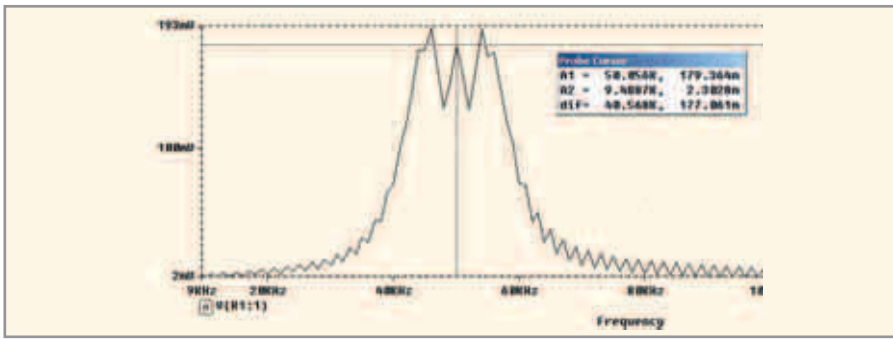


Рис. 4. Амплитудный спектр ЛЧМ-радиоимпульса в системе схемотехнического моделирования DesignLAB

```

I1(tj,n) := cos [ 2*pi*(fc0 - Deltaf/2) * (tj - Tc*n/7) + beta * (tj - Tc*n/7)^2 ]
I2(tj,n) := cos [ 2*pi*(fc0 + Deltaf/2) * (tj - Tc*(n)/7) - beta * (tj - Tc*(n)/7)^2 ]
LCMj := sum_{n=0}^{N-1} if (Tc*n/7 < tj <= Tc/7 + Tc*n/7, if(mn = 1, I1(tj,n) * I2(tj,n), 0))
    
```

Рис. 5. Фрагмент программного кода источника семиэлементного сигнала с внутримпульсным ЛЧМ-заполнением

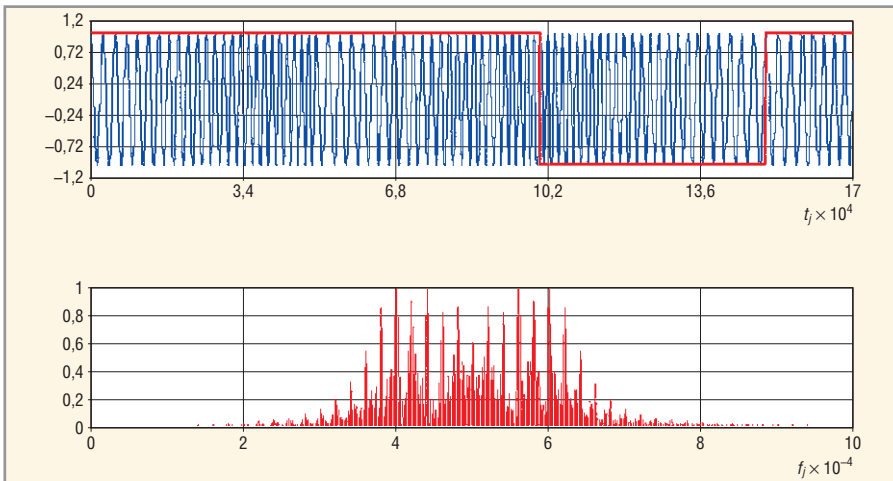


Рис. 6. Результаты моделирования сигнала с внутримпульсным ЛЧМ-заполнением

мощью выражения $(t_j - T_c n / N_i)$, где n – номер импульса в пачке. Затем воспользуемся операцией суммирования сдвинутых во времени элементарных импульсов для формирования результирующего сигнала. С учётом рассмотренных действий выражение для формирования семиэлементного сигнала с внутримпульсным ЛЧМ-заполнением можно записать в виде, показанном на рисунке 5.

Перед этим 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 рас-

смотренной выше модели ЛЧМ-радиоимпульса. На рисунке 6 представлены результаты моделирования сигнала с внутримпульсным ЛЧМ-заполнением для указанных параметров.

Модель ЛЧМ-радиоимпульса с прямоугольным заполнением

В настоящее время в радиотехнике всё большее применение находят сложные сигналы на основе ЛЧМ-радиоимпульсов с прямоугольным заполнением. Спектры таких сигналов содержат нечётные гармоники, из которых возможно извлечь дополнительную информацию об объекте радиотехничес-

кой разведки. Модель такого сигнала можно получить на основе следующего аналитического выражения [6]:

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

где $S_C(t)$ – 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 учётом рассмотренного способа формирования ЛЧМ-сигнала с прямоугольным заполнением можно дополнить предыдущую модель следующим программным кодом:

```

di_j := if(d_j <= 0, -1, 1)
di_j := if(t_j > T_c N / 7, 0, di_j)
Swi := cfft(di)   vi_j := |Swi_j|   ri := max(vi)
bi_j := vi_j / ri
    
```

В верхней строке мы формируем ЛЧМ-сигнал с прямоугольным заполнением в соответствии с выражением (6), затем рассчитываем и нормируем его амплитудный спектр. На рисунке 7 представлены результаты моделирования ЛЧМ-радиоимпульса с прямоугольным заполнением.

Модель последовательности радиоимпульсов с фазокодовой манипуляцией

К сложным сигналам относятся также радиоимпульсы с фазокодовой манипуляцией (ФКМ), обеспечивающие повышение помехоустойчивости приёма и скрытности при излучении таких сигналов.

Колебание ФКМ можно представить в виде последовательности импульсов длительностью $\tau_0 = \tau_u / m$, амплитудой S_m и фазой $\omega_0 t + \varphi(t)$, каждый из которых определяется следующей формулой:

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

где $\varphi(t)$ – закон изменения фазы. При этом в качестве первичных сигналов,

как правило, используются сигналы с кодом Баркера. Воспользуемся алгоритмом расчёта временного представления первичной импульсной последовательности [1] в виде нескольких пачек с кодовым формированием элементарных посылок:

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

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:

Длительность пачки импульсов:
 $T_c := 10^{-3}$
 Период следования импульсов:
 $Per := 4 \times 10^{-3}$
 Количество пачек: $N := 0$
 Кодовая последовательность:
 $Kc := 7$ $m0 := 1$ $m1 := 1$ $m2 := 0$
 $m3 := 0$ $m4 := 0$ $m5 := 1$ $m6 := 0$

Заметим, что в качестве первичного сигнала мы использовали семиэлементный код Баркера, имеющий наименьший уровень боковых лепестков автокорреляционной функции. Убедиться в этом можно после создания модели и выполнения моделирования с другими значениями параметров последовательности m_k . Покажем оставшуюся часть программного кода модели ФКМ-радиоимпульса, а затем поясним введённые идентификаторы (см. рис. 8).

В первой строке программного кода задаём количество отсчётов, формируем массивы времени и частоты, задаём несущую частоту импульса (50 кГц). Следует отметить, что некоторые параметры модели, такие как несущая частота, длительность пачки импульсов и др., выбраны исходя из

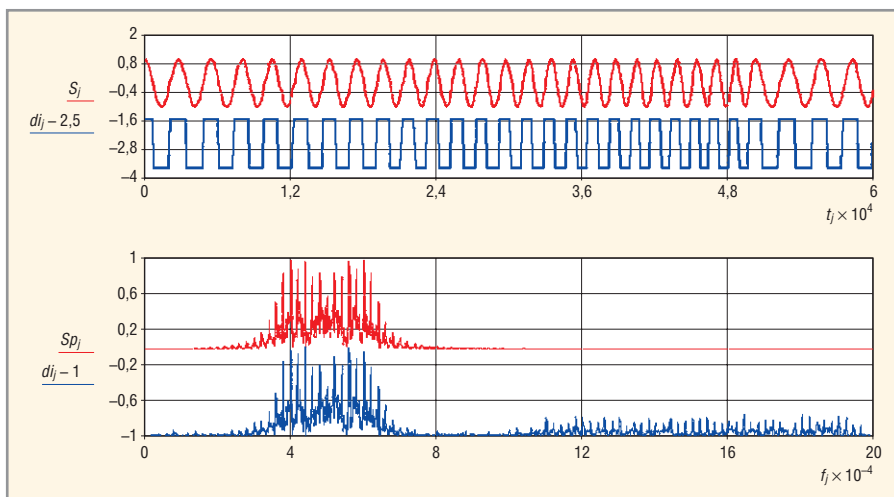


Рис. 7. Результаты моделирования ЛЧМ-импульсов с синусоидальным и прямоугольным заполнением

```

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/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/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:=cff(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(iccff(Q))  H:=max(B)  KF_j:=B_j/H
i:=0..1  sig_j,i:=iff(i=0, t_j, d_j)  WRITEPRN"sig.dat" := sig
    
```

Рис. 8. Программный код модели ФКМ-радиоимпульса

того, чтобы читатель смог на рисунках увидеть моменты перехода фазы от посылки к посылке. При использовании источника сигнала для моделирования радиоэлектронных устройств можно задать необходимые значения этих параметров, не забывая о взаимосвязи количества отсчётов N временного и частотного массивов модели.

Во второй строке программного кода формируем первичную последовательность импульсов a_j в третьей строке – ФКМ-радиоимпульс с использованием массива a_j . В строках 4 и 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 рисунке 9 показаны результаты моделирования ФКМ-радиоимпульса с использованием разработанной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм позволяет формировать не только одиночный ФКМ-радиоимпульс, но и последова-

тельность с изменяемыми количеством и периодом следования радиоимпульсов. Применяя описанные в статье алгоритмы формирования сложных сигналов, читатель сможет создавать (или модифицировать) источники ЛЧМ- и ФКМ-радиоимпульсов (сигналов) и использовать их для моделирования различных радиоэлектронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипенский П. Моделирование источников сигналов с дискретной модуляцией. Современная электроника. 2007. № 8. С. 58–61.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Радио и связь, 1986.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Питер, 2003.
4. Richard C. Saffe. Random Signals for Engineers using MATLAB and Mathcad. Springer-Verlag, 2000.
5. Раевич В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. Солон, 1999.
6. Абрамов В.С. Обнаружение-измерение пачечных ЛЧМ-сигналов в многоцелевых ситуациях. Радиотехника. 1998. № 4. С. 119–121.