

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ  
С ВНУТРИИМПУЛЬСНОЙ ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

<sup>1</sup>А.Г. Сетов, <sup>2</sup>Л.В. Просвирякова, <sup>2</sup>В.Е. Засенко

**THE PRACTICAL APPLICATION OF COMPLEX SIGNALS WITH A FREQUENCY  
OF INTRAPULSE MANIPULATION**

<sup>1</sup>A.G. Setov, <sup>2</sup>L.V. Prosviryakova, <sup>2</sup>V.E. Zasenko

В данной работе рассмотрен метод передачи информации сложными сигналами (сигналами Баркера) с внутриимпульсной частотной минимальной манипуляцией. Описано устройство формирования кодовой последовательности, необходимой для модуляции сигналов с несущей и поднесущей частотой каналов квадратурного модулятора. Приведен анализ характеристик сигналов с различными видами манипуляции. В заключение описаны методы практического применения шумоподобных сигналов с минимальной частотной манипуляцией.

This work presents a method of information transfer by complex signals (Barker signals) with a minimum-shift-keying. A device generating the code sequence signals necessary for modulation the carrier and subcarrier frequency signals of the quadrature modulator channels was described. The analysis of the characteristics of the different digital modulation types was given. In conclusion, the methods of the practical application of noise-like signals with a minimum shift keying were described.

В настоящее время необходимо, чтобы передаваемые информационные сигналы занимали как можно меньшую полосу частот и при этом обладали максимальной помехозащищенностью. Передача информации сложными шумоподобными сигналами позволяет повторно использовать полосу частот. Одним из видов сложных сигналов являются сигналы Баркера, обладающие наилучшей автокорреляционной функцией. Обычно при использовании сложных сигналов применяется фазовая манипуляция. Для формирования шумоподобного сигнала с частотной манипуляцией был предложен метод передачи информации сложными сигналами с внутриимпульсной минимальной частотной манипуляцией [Засенко, Просвирякова, 2003].

В основе предложенного способа передачи информации лежит формирование модуляционных кодов квадратурной и синфазной составляющих сложного сигнала. Полученные сигналы модулируют по фазе синусное и косинусное колебания с поднесущей частотой, период которого равен четырехкратной длительности элементарной посылки применяемого кода. После этого модулированные колебания подаются на квадратурный модулятор. В результате получается сложный частотно-манипулированный сигнал с минимальным индексом  $m=0.5$ .

На рисунке представлена структурная схема устройства формирования сложного сигнала с минимальной частотной манипуляцией (MSK). В данной схеме используются два управляющих сигнала: тактовая частота  $f_{\text{такт}}$  и импульсы запуска, следующие с частотой  $f_{\text{запуска}} = \frac{f_{\text{такт}}}{5}$ , обладающие скважностью  $q=10\%$ .

В блоке формирования модуляционной последовательности генерируются коды квадратурных каналов для последующего преобразования в шумоподобный сигнал Баркера. В данной схеме используется последовательность длительностью  $N=5$ . Сигналы Баркера обладают наилучшими автокорреляционными свойствами. Однако в методе формирования сигналов с MSK используется два квадратурных

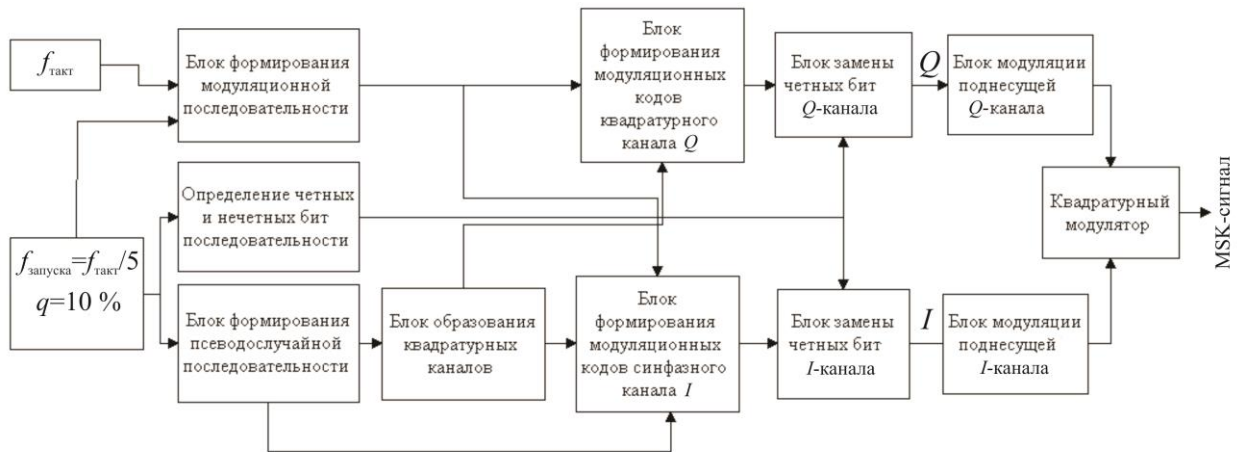
канала, поэтому в каждом из каналов применяется отдельный код. Коды подбираются таким образом, чтобы на выходе квадратурного модулятора получался необходимый сложный сигнал.

В блоке генерируются коды квадратурного и синфазного каналов. Для квадратурного канала  $Q$  последовательность имеет вид  $\{1,1,1,1,0\}$ , для синфазного канала  $I - \{1,1,1,0,0\}$ . Таким образом, в ходе последующей нормировки сигналов на выходах квадратурных каналов модулятора будут последовательности уровней сигнала  $\{1,1,1,1,-1\}$  для  $Q$ -канала и  $\{1,1,1,-1,-1\}$  для  $I$ -канала. Эти сигналы будут отражать логическую единицу информационной последовательности. Для передачи логического нуля последовательности будут инвертированы. Следовательно, информационная последовательность на выходе квадратурного модулятора будет преобразована в код Баркера  $\{1,1,1,-1,1\}$  для логической единицы и в последовательность  $\{-1,-1,-1,1,-1\}$  для логического нуля, что является поразрядным произведением кодовых последовательностей квадратурных каналов.

Устройство формирования модуляционных кодов реализуется с помощью последовательного регистра сдвига и двух RS-триггеров. Подробно схемы получения сигналов Баркера с различной длительностью  $N$  описаны в [Засенко, Просвирякова, 2006].

В качестве пробной информационной последовательности в данной схеме используется сигнал, получаемый в блоке формирования псевдослучайной последовательности. Для этого используется регистр сдвига, охваченный обратной связью через элемент «исключающее ИЛИ». Данное устройство позволяет формировать последовательности длительностью  $(2n-1)$ , где  $n$  – число триггеров в регистре сдвига. Для  $n=4$  элементам последовательность будет повторяться каждые 15 бит и иметь вид  $\{1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0\}$ .

Для того чтобы получить на выходе модулятора сигнал с MSK необходимо, чтобы сигнал, следующий с поднесущей частотой  $f_{\text{н.н.}} = \frac{f_{\text{такт}}}{4}$ , перемножался с прямоугольным сигналом, длительность которого должна быть кратна 2 по отношению к частоте следо-



Структурная схема устройства формирования сложного сигнала с минимальной частотной манипуляцией.

вания бит модуляционной последовательности Баркера ( $f_{\text{такт}}$ ). Таким образом, фаза модулированной поднесущей для каждого канала будет изменяться только в моменты перехода синусоидального сигнала через ноль. Однако последовательные нули и единицы сигналов Баркера имеют нечетную длительность  $\{1,1,1,-1,1\}$ . Для соблюдения условия неразрывности фазы последовательности в квадратурных каналах, стоящие на четных интервалах, меняются между собой, в результате чего число логических единиц или нулей модуляционных сигналов всегда будет кратно 2. Например, в  $Q$ -канале проходит инверсная последовательность  $\{0,0,0,0,1\}$ , при этом в следующем интервале последовательность должна иметь вид  $\{11110\}$ . Поэтому необходимо, чтобы коды квадратурных каналов на четных интервалах сигнала менялись, и в  $Q$ -канал поступит последовательность синфазного канала  $\{1,1,1,0,0\}$ , следовательно, число идущих подряд единиц будет четным.

Для образования сигналов квадратурных каналов необходимо, чтобы закодированный сигнал отражал информационную последовательность и соблюдалось условие четности количества идущих подряд логических нулей или единиц.

Видно, что логическая единица информационной последовательности получается из произведения последовательностей  $\{1,1,1,1,-1\}$  и  $\{1,1,1,-1,-1\}$  или  $\{-1,-1,-1,-1,1\}$  и  $\{-1,-1,-1,1,-1\}$ , логический ноль при перемножении последовательностей  $\{1,1,1,1,-1\}$  и  $\{-1,-1,-1,1,1\}$  или  $\{-1,-1,-1,-1,1\}$  и  $\{1,1,1,-1,-1\}$ .

Кодирование, которое позволяет выполнить все перечисленные условия, описывается следующим образом: в квадратурный канал поступает модуляционная последовательность при нечетных «1» информационной последовательности и «0», следующие за ними, и инверсная последовательность при четных «1» и «0», следующие за ними. В синфазный канал модуляционная последовательность поступает при нечетных «1» информационной последовательности и «0», следующих за четными «1», и инверсная последовательность при четных «1» и «0», следующих за нечетными «1».

В результате была получена схема, реализующая метод передачи информации сложными сигналами с внутриимпульсной минимальной частотной манипуляцией. Видно, что данная схема отличается относительной простотой. Проведем сравнение характеристик различных видов манипуляции.

Ширина главного лепестка спектра сигнала с минимальной частотной манипуляцией равна  $1.5 \cdot B_r$ , где  $B_r$  – скорость передачи сложного сигнала. Сигналы с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK) обладают наилучшей помехоустойчивостью за счет изменения фазы на  $180^\circ$ . Ширина главного лепестка у таких сигналов равна  $2 \cdot B_r$ , кроме того, они обладают высоким уровнем боковых лепестков ( $-13$  дБ первый лепесток). Спектр сигналов с квадратурной фазовой манипуляцией (QPSK) по форме совпадает с сигналами BPSK, но за счет того, что одному передаваемому символу соответствуют два бита информации, спектр QPSK в два раза плотнее. Более плотным спектром обладают модификации квадратурной фазовой манипуляции: смещенная квадратурная фазовая манипуляция (OQPSK), в которой отсутствуют переходы фазы на  $180^\circ$ , квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом  $\pi/4$  ( $\pi/4$ -OQPSK), где фаза может меняться на  $45^\circ$  или на  $135^\circ$ , и смещенная квадратурная фазовая манипуляция с округлением по Найквисту (NOQPSK).

В сигналах с NOQPSK прямоугольная огибающая в исходной последовательности скругляется таким образом, чтобы полярность сигнала была различима в середине элементарного информационного бита. Для этого применяются функции, которые позволяют получить форму спектра в виде кососимметричного среза с коэффициентом скругления  $\alpha$ . Для уменьшения спектра MSK-сигналов применяется фильтр Гаусса. При этом исходная последовательность сглаживается, и в результате фаза сигнала с минимальной манипуляцией изменяется плавно, что приводит к сужению спектра сигнала и уменьшению помехоустойчивости. Спектральная эффективность NOQPSK сигналов в линейном канале выше, чем у GMSK. В нелинейных каналах более эффективна GMSK. Для оценки помехоустойчивости находят отношение сигнал/шум, которое обес-

печивает заданную вероятность ошибки  $P_{ош}=10^{-4}$ . Сигналы с BPSK, QPSK, NOQPSK,  $\pi/4$ -QPSK и MSK характеризуются одинаковой помехоустойчивостью [Сердюков, Шевцов, 1998]. В сигналах с GMSK необходимое отношение сигнал/шум выше на 1 дБ, по сравнению с MSK.

Таким образом, предложенная схема получения сложного сигнала с минимальной частотной манипуляцией может применяться в системах, где необходим компромисс между высокой помехозащищенностью BPSK-сигналов, узким спектром NOQPSK-сигналов и простотой устройства, например в диагностике атмосферы или гидроакустике с применением сверхширокополосных зондирующих сигналов. Использование фильтра Гаусса позволит использовать схему в сетях передачи данных.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Засенко В.Е., Просвирякова Л.В. Способ формирования шумоподобных радиоимпульсов для передачи бинарных символов информации сложными сигналами. Патент РФ на изобретение № 2231924 от 13 января 2003.

Засенко В.Е., Просвирякова Л.В. Коды Баркера с минимальной манипуляцией // Современные проблемы радиэлектроники. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 93–99.

Сердюков П.Н., Шевцов И.Ф. Выбор методов модуляции в цифровых радиоканалах // Специальная техника. 1998. № 4–5.

<sup>1</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

<sup>2</sup>*Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия*