

УДК 621.391

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ КВАНТОВАНИИ

Брюханов Ю.А., д.т.н., зав. кафедрой Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, e-mail: bruhanov@uniyar.ac.ru;

Лукашевич Ю.А., вед. электроник Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, e-mail: dcslab@uniyar.ac.ru.

NONLINEAR DISTORTION SIGNALS WITH AMPLITUDE MODULATION IN QUANTIZATION

Bryukhanov Yu.A., Lukashovich Yu.A.

The effects of quantization of signals with harmonic amplitude modulation on the nonlinear distortion of modulating signals for an arbitrary number of digits in the numbers representation and approximation for different methods of coding are investigated.

Fractional arithmetic in direct or complementary codes with truncation or rounding were assumed for numbers' representation.

The quantized modulated signal is demodulated and then its nonlinear distortion factor is computed based on the calculated spectrum of the demodulated signal.

The dependences of the modulated signal distortion factor on the number of digits, the method of coding and approximation of numbers, as well as on the value of the amplitude modulation coefficient are established.

Key words: amplitude modulation, quantization, spectral analysis, nonlinear distortion, coding, direct and complementary codes, demodulation, truncation, rounding.

Ключевые слова: амплитудная модуляция, квантование, спектральный анализ, нелинейные искажения, кодирование, прямой и дополнительный коды, демодуляция, усечение, округление.

Введение

Магистральным направлением развития техники радиоприема является постепенный переход от традиционных схем построения, когда функции физического уровня (фильтрация, преобразование спектра, демодуляция, усиление сигналов и т.д.) выполняется аппаратными методами, к программно-управляемому (Software Controlled Radio – SCR) и далее – к программно-конфигурируемому (Software Defi-ned Radio – SDR), адаптивному (Adaptive Radio – AR) и когнитивному (Cognitive Radio – CR) радио [1]. Связующим звеном между аппаратной и программной частями радиоприемного устройства (РПУ) является аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), в котором осуществляется дискретизация принимаемого сигнала по времени и квантование по уровню.

Вследствие ступенчатого вида характеристики квантователя [2] преобразуемые сигналы претерпевают нелинейные искажения, называемые эффектами квантования, ухудшающие технические характеристики РПУ такие, как коэффициент нелинейных искажений, избирательность по соседнему каналу, блокирование, интермодуляция [3]. Искажения наиболее сильно проявляются при использовании для представления чисел арифметики с фиксированной запятой.

Искажения гармонических сигналов при квантовании исследованы в работах [4-6]. Влияние квантования на

Исследовано влияние квантования сигналов с гармонической амплитудной модуляцией на нелинейные искажения модулирующих сигналов при произвольном числе разрядов, для разных способов кодирования и аппроксимации чисел.

Полагали, что для представления чисел используется дробная арифметика в прямом или дополнительном кодах с усечением или округлением, при разных значениях числа разрядов.

Квантованный модулированный сигнал демодулируется, рассчитываются спектр и коэффициент нелинейных искажений выходного сигнала демодулятора.

Установлены зависимости искажений модулирующего сигнала от числа разрядов, способов представления чисел и коэффициента амплитудной модуляции.

искажения модулированных сигналов ранее не рассматривалось.

Известны две математические модели процесса квантования. Наиболее широкое распространение получила линейная статистическая модель, согласно которой характеристика квантователя считается линейной, а процесс квантования представляется как наложение на входной сигнал квантователя шума квантования, имеющего среднее значение и дисперсию, определяемые шагом квантования, а также способами кодирования и аппроксимации чисел [7]. При этом вклад ошибки квантования измеряется в виде отношения мощности сигнала к дисперсии шума квантования (отношения сигнал/шум). Однако эта модель применима только при выполнении следующих условий: во-первых, последовательность значений ошибки является последовательностью выборок стационарного случайного процесса, во-вторых, последовательность значений ошибки не коррелирована с последовательностью точных значений сигнала, в-третьих, ошибки не коррелированы между

собой (представляют собой белый шум) и, в-четвёртых, распределение вероятности ошибки равномерно во всем диапазоне ошибок квантования.

Вышеуказанные предположения до некоторой степени произвольны. Приведем примеры, когда они неверны: например, если на вход квантователя поступает постоянный сигнал или гармонический, дискретизированный с частотой, рационально кратной частоте синусоиды. В первом случае все ошибки одинаковы и равны, а во втором они образуют периодическую последовательность.

На практике линейная статистическая модель применима, если число уровней квантования и связанное с ним число разрядов R в представлении чисел достаточно велики. Важно отметить, что линейная статистическая модель процесса квантования не позволяет рассчитать нелинейные искажения сигналов при квантовании.

От этих недостатков свободна более сложная нелинейная модель квантования. Она позволяет рассчитывать и процессы при произвольном числе уровней квантования, и возникающие при этом нелинейные искажения. Эта модель использована, в частности, в работах [3-6] для расчета нелинейных искажений гармонических сигналов.

Цель данной работы – исследование влияния квантования сигналов с гармонической амплитудной модуляцией на нелинейные искажения модулирующих сигналов при произвольном числе разрядов R , для разных способов кодирования и аппроксимации чисел.

Анализ нелинейных искажений сигналов с гармонической амплитудной модуляцией

На рис. 1 представлена структурная схема решения задачи. Модулированный сигнал $x(n)$ поступает на вход квантователя. В демодуляторе квантованный модулированный сигнал $y(n)$ преобразуется в модулирующий сигнал $Y(n)$. Перед расчетом коэффициента нелинейных искажений K в анализаторе спектра определяется спектральный состав $Y(k)$ сигнала $Y(n)$.

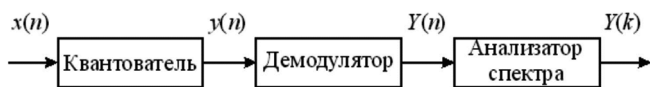


Рис. 1. Структурная схема решения поставленной задачи анализа

В табл. 1 представлены характеристики квантователей. Здесь $q = 2^{-R}$ – шаг квантования, $[\]$ – целая часть числа.

Спектральные характеристики $Y(k)$ демодулированного сигнала $Y(n)$ определяем с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). При этом для целых нормированных периодов T модулирующего сигнала, где $T = T_M / T_D$, T_M – период модулирующего сигнала, T_D – период дискретизации модулированного сигнала $x(n)$, используем классическую формулу [7]

$$Y(k) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{T-1} Y(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} kn\right). \quad (1)$$

Коэффициент нелинейных искажений [8], с учетом свойства симметрии ДПФ, выражаем зависимостью

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{T/2} |Z(k)|^2}}{|Z(1)|} \times 100\%, \quad (2)$$

где

$$|Z(k)| = \begin{cases} |Y(k)| & \text{при } k \in \{0; T/2\}, \\ 2|Y(k)| & \text{при } k \in (0; T/2). \end{cases} \quad (3)$$

При нецелом числе отношения $T = P / N$, где P и N – простые числа, согласно методике [9, 10] имеем

$$Y(k) = \frac{1}{P} \sum_{n=0}^{P-1} Y(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{T} kn\right),$$

а расчет коэффициента K осуществляем по формулам (2) и (3) с заменой T на P .

Сигнал с гармонической амплитудной модуляцией на входе квантователя выражаем функцией

$$x(n) = A(n) \cos \omega_0 n,$$

где $A(n) = A(1 + M \cos \Omega n)$ – огибающая, A – амплитуда несущего колебания, $M = \Delta A / A$ – коэффициент амплитудной модуляции, $\Omega = 2\pi / T$, $\omega_0 = 2\pi / T_0$, $T_0 = T_H / T_D$ – нормированный период несущего колебания, T_H – период несущего колебания. На выходе квантователя имеем сигнал $y(n) = f(x(n))$, где $f(\varphi)$ – характеристика квантователя.

Для выделения модулирующего сигнала используем синхронный квадратурный амплитудный детектор [11], структурная схема которого приведена на рис. 2. В отсутствие квантователя, т.е. при $y(n) = x(n)$, на выходе первого сумматора имеем огибающую $A(n)$, а на выходе второго сумматора – демодулированный модулирующий сигнал $Y(n) = \Delta A \cos \Omega n$.

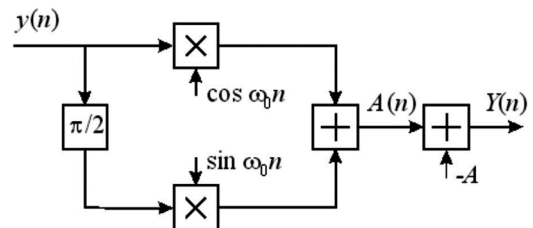


Рис. 2. Структурная схема квадратурного амплитудного детектора

Выполнены расчеты спектральных характеристик $Y(k)$ и коэффициента нелинейных искажений K модулирующего сигнала $Y(n)$ при квантовании сигнала с амплитудной модуляцией. Полагали, что амплитуда несущего колебания $A = 0,5$, приведенные частоты несущего колебания $\omega_0 = 0,6\pi$ и модулирующего сигнала $\Omega = 0,06\pi$. Заметим, что выбор величины $A = 0,5$ соответствует максимальному значению амплитуды несущего колебания при $M = 1$, когда отсутствует переполнение разрядной сетки. Для представления чисел используется дробная арифметика в прямом или дополнительном кодах с усечением или округлением, при разных значениях числа разрядов R и коэффициента M .

Таблица 1. Способы представления чисел и вид характеристик квантователя

Представление чисел		Характеристика квантователя $f(\varphi)$	
Код	Аппроксимация	Аналитическое выражение	График
Прямой	Усечение	$f(\varphi) = \begin{cases} q \left\lfloor \frac{\varphi}{q} \right\rfloor & \text{при } \varphi \leq 1 - q \\ (1 - q) \text{sign } \varphi & \text{при } \varphi > 1 - q \end{cases}$	
Прямой	Округление	$f(\varphi) = \begin{cases} q \left\lfloor \frac{\varphi + \text{sign } \varphi}{2} \right\rfloor & \text{при } \varphi \leq 1 - \frac{3q}{2} \\ (1 - q) \text{sign } \varphi & \text{при } \varphi > 1 - \frac{3q}{2} \end{cases}$	
Дополнительный	Усечение	$f(\varphi) = \begin{cases} q \left\lfloor \frac{\varphi + 1}{q} \right\rfloor - 1 & \text{при } -1 + q \leq \varphi < 1 - q \\ 1 - q & \text{при } \varphi \geq 1 - q \\ -1 & \text{при } \varphi < -1 + q \end{cases}$	
Дополнительный	Округление	$f(\varphi) = \begin{cases} q \left\lfloor \frac{\varphi + 1 + \frac{1}{2}}{q} \right\rfloor - 1 & \text{при } -1 + \frac{q}{2} \leq \varphi < 1 - q - \frac{q}{2} \\ 1 - q & \text{при } \varphi \geq 1 - q - \frac{q}{2} \\ -1 & \text{при } \varphi < -1 + \frac{q}{2} \end{cases}$	

Таблица 2.

Число разрядов	Коэффициент нелинейных искажений, %		
	Прямой код		Дополнительный код с усечением
	с усечением	с округлением	
2	35,6	18,2	44,2
4	8,86	5,06	10,3
6	2,38	1,15	2,41
8	0,58	0,32	0,67

Результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений K для коэффициента амплитудной модуляции $M = 1$ представлены в табл. 2, а на рис. 3 приведены графики зависимости коэффициента K от числа разрядов R . На рис. 3 и ниже кривая 1 соответствует прямому коду с усечением, кривая 2 – прямому коду с округлением, кривая 3 – дополнительному коду с усечением.

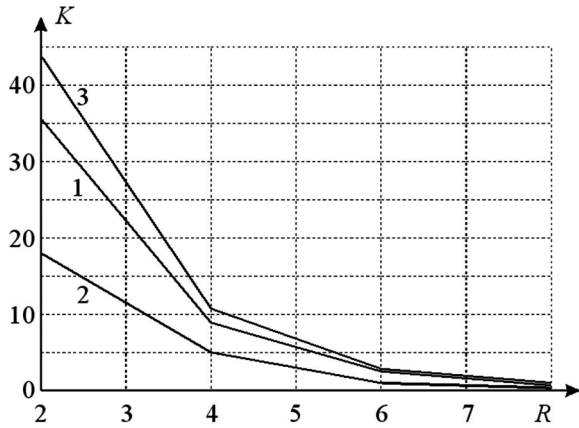


Рис. 3. Влияние эффектов квантования на нелинейные искажения модулирующего сигнала для коэффициента амплитудной модуляции $M = 1$

В табл. 3 и на рис. 4 представлены результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений для коэффициента амплитудной модуляции $M = 0,5$.

Таблица 3.

Число разрядов	Коэффициент нелинейных искажений, %		
	Прямой код		Дополнит. код с усечением
	с усечением	с округлением	
2	85,1	35,8	89,9
4	19,0	9,45	20,7
6	5,15	2,09	5,22
8	1,11	0,61	1,26

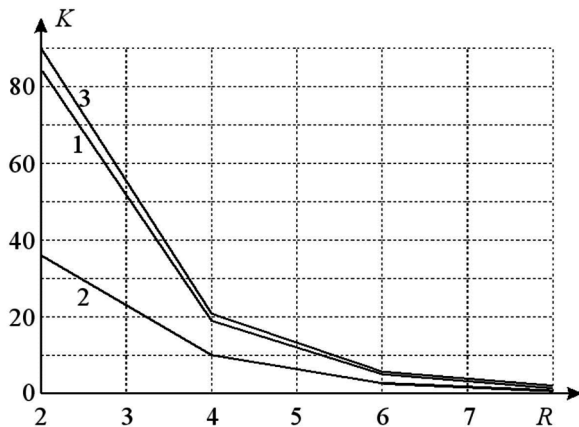


Рис. 4. Влияние эффектов квантования на нелинейные искажения модулирующего сигнала для коэффициента модуляции $M = 0,5$

Результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений K для коэффициента модуляции $M = 0,3$ представлены в табл. 4, а на рис. 5 приведены графики зависимости коэффициента K от числа разрядов R .

Таблица 4.

Число разрядов	Коэффициент нелинейных искажений, %		
	Прямой код		Дополнит. код с усечением
	с усечением	с округлением	
2	109,8	70,4	121,4
4	31,0	16,5	33,7
6	7,56	4,32	8,63
8	2,01	1,16	2,14

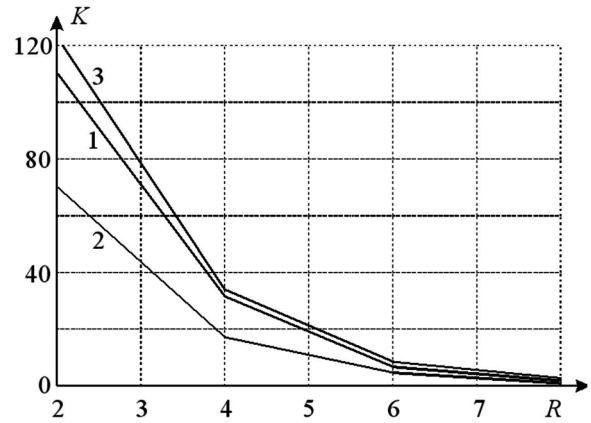


Рис. 5. Влияние эффектов квантования на нелинейные искажения модулирующего сигнала для коэффициента модуляции $M = 0,3$

Заключение

Представленные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

С увеличением числа разрядов R от 2 до 8 коэффициент нелинейных искажений K уменьшается:

– при коэффициенте $M = 1$ от 36,1 до 0,58 % (прямой код с усечением), от 26,2 до 0,33% (прямой код с округлением), от 44,2 до 0,67 % (дополнительный код с усечением);

– при коэффициенте $M = 0,5$ от 85,1 до 1,11 % (прямой код с усечением), от 35,7 до 0,61 % (прямой код с округлением), от 89,9 до 1,26 % (дополнительный код с усечением).

Увеличение нелинейных искажений при использовании дополнительного кода с усечением по сравнению с прямым кодом обусловлено асимметрией характеристики квантователя при использовании дополнительного кода с усечением.

С увеличением числа разрядов R влияние его на величину коэффициента K уменьшается. При представлении чисел в дополнительном коде с округлением нелинейные искажения модулирующего сигнала незначительно отличаются от таковых, когда используется прямой код с округлением.

Увеличение искажений с уменьшением коэффициента M обусловлено уменьшением числа действующих разрядов R (уровней квантования) в представлении чисел.

Результаты работы могут использоваться при проектировании систем передачи сообщений с цифровой обработкой сигналов.

Литература

1. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая линия-Телеком. 2013.
2. Аналого-цифровое преобразование: под ред. У. Кестера. М.: Техносфера. 2007.
3. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. Влияние аналого-цифрового преобразования сигналов на нелинейные явления в радиоприемных устройствах, Радиотехника, 2017, № 2. С 31-36.
4. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. Нелинейные искажения гармонических сигналов при квантовании // Радиотехника. 2009, № 10. С. 57.
5. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. Влияние избыточной дискретизации на нелинейные искажения при аналого-цифровом преобразовании сигналов // Радиотехника. 2014, № 12. С. 30.
6. Брюханов Ю.А., Лукашевич Ю.А. нелинейные искажения при сигма-дельта аналого-цифровом преобразовании сигналов // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 3. С. 224-233.
7. Каппелини В., Константиноидис А.Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение. М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы, М.:ЛЕНАНД, 2016.
9. Брюханов Ю.А. Методика исследования нелинейных колебаний в системах дискретного времени при периодических воздействиях // Радиотехника и электроника. Т. 51, № 2. 2006. С 196-201.
10. Брюханов Ю.А. Метод исследования периодических процессов в неавтономных системах дискретного времени с квантованием // Радиотехника и электроника. Т. 53, № 7. 2008. С 851-857.
11. Радиоприемные устройства / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин и др.; Под ред. Н.Н. Фомина. М.: Горячая линия-Телеком, 2007.

НОВЫЕ КНИГИ

Бартенев В.Г.

Модельно-ориентированное проектирование программируемых радиотехнических устройств / Практический курс – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2019 г. – 116 с.: ил.

Рассмотрен способ разработки программируемых устройств, основанный на модельно-ориентированном проектировании. Приведены примеры использования данного способа при разработке типовых радиотехнических устройств на наиболее распространенных микроконтроллерах фирмы Atmel. Освоение модельно-ориентированного проектирования на бюджетных, массового применения платах Arduino обеспечивает готовность разработчиков к широкому и эффективному использованию программируемых микроконтроллеров, сигнальных процессоров и ПЛИС при разработке радиотехнических систем различного назначения.

Для широкого круга читателей, интересующихся вопросами программирования микроконтроллеров и проектирования радиотехнических устройств, а также для студентов высших учебных заведений, обучающихся по соответствующим направлениям и специальностям.

Благодаров А.В.

Программирование микроконтроллеров семейства 1986VE9х компании Миландр – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2016 г. – 232 с.: ил.

Рассмотрены основы программирования на языке Си отечественных 32-разрядных микроконтроллеров семейства 1986VE9х фирмы Миландр. Основное внимание уделено работе со встроенными в микроконтроллеры периферийными устройствами: портами ввода-вывода, АЦП, ЦАП, аппаратными таймерами-счетчиками, часами реального времени. Предполагается использование отладочной платы для микроконтроллера K1986VE92QI, системы программирования Keil μ Vision и операционной системы реального времени Keil RTX. Приведены задания для практической работы, методика их выполнения, примеры программ и контрольные вопросы для самопроверки.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 09.03.04 – «Программная инженерия», а также других направлений и специальностей, изучающих основы программирования микроконтроллеров, будет полезно широкому кругу читателей.

