

УДК 621.391.26 (075)  
621.391.3 (075)

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ, протокол №68 от 16.05.2017 г.

Иванова, В.Г., Тяжев, А.И.

**Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры:** учебное пособие (второе издание) / Под ред. д.т.н., профессора Тяжева А.И. – Самара: ПГУТИ, 2017. - 252 с

Учебное пособие «Цифровая обработка сигналов и сигнальные процессоры» в доступной форме изложен материал, описывающий процессы, происходящие в устройствах цифровой обработки сигналов (ЦОС). Описаны процессы дискретизации и квантования сигналов, приводятся сведения из теории Z-преобразования, быстрого преобразования Фурье, вейвлет-преобразования, обширный материал посвящен цифровым фильтрам, цифровым генераторам, фазорасщепителям, демодуляторам и т.д. Рассмотрена архитектура сигнальных процессоров и организация вычислений в них, приведены методики расчета различных устройств ЦОС и программы их расчета и моделирования.

По сравнению с первым изданием расширен раздел «Дискретное преобразование Фурье» и добавлены материалы по синтезу цифровых фильтров в программной среде Matlab,

Материал пособия содержит много рисунков, поясняющих происходящие в устройствах ЦОС процессы, а также временные диаграммы, графики и характеристики различных устройств ЦОС.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 110302 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», оно также окажется полезным для аспирантов, магистрантов и инженерно-технических работников, специализирующихся в области разработки устройств ЦОС

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	<b>7</b>
1. Области применения цифровой обработки .....	7
2 Классификация сигналов.....	7
3 Виды и системы обработки сигналов .....	9
4 Элементная база цифровой обработки сигналов .....	12
5 Преимущества и недостатки ЦОС по сравнению с аналоговой обработкой.....	13
<b>1 Дискретизация непрерывных сигналов</b> .....	<b>14</b>
1.1 Спектр дискретной косинусоиды. Эффект размножения спектра.....	14
1.2 Дискретизация периодического аналогового сигнала с ограниченным спектром. Эффект наложения спектров. Выбор частоты дискретизации .....	15
1.3 Дискретизация апериодических аналоговых сигналов .....	17
1.4 Дискретизация узкополосных модулированных сигналов .....	18
1.5 Прореживание и интерполяция дискретных сигналов.....	22
<b>2 Квантование дискретных сигналов</b> .....	<b>26</b>
2.1 Квантование с равномерным шагом (линейное квантование) .....	26
2.2 Квантование с переменным шагом (нелинейное квантование).....	28
<b>3 Цифровые фильтры</b> .....	<b>30</b>
3.1 Z – преобразование и его свойства.....	30
3.2 Импульсная характеристика цифрового фильтра. Понятие о нерекурсивных и рекурсивных цифровых фильтрах, БИХ – и КИХ - фильтрах .....	32
3.3 Определение выходного сигнала фильтра по входному сигналу и импульсной характеристике .....	32
3.4 Системная функция цифрового фильтра. Формы программной реализации фильтра .....	34
3.5 Частотная характеристика цифрового фильтра .....	38
3.6 Цифровой резонатор .....	39
3.7 Однородный фильтр .....	43
3.8 Треугольный фильтр .....	46
3.9 Устойчивость цифровых фильтров .....	47
3.10 Коэффициенты системной функции устойчивого звена второго порядка.....	49
3.11 Нерекурсивный фильтр с линейной ФЧХ .....	50
3.12 Синтез нерекурсивного фильтра с линейной ФЧХ методом ряда Фурье и «окна» .....	51
3.13 Синтез фильтров с линейной ФЧХ и АЧХ, описываемой функцией без разрывов, методом ряда Фурье.....	55
3.14 Синтез нерекурсивных фильтров с линейной ФЧХ методом наименьших квадратов .....	60
3.15 Расчёт нерекурсивных цифровых фильтров с рельефной АЧХ методом наименьших квадратов.....	64
3.16 Метод наилучшей равномерной (чебышевской) аппроксимации.....	69
3.17 Синтез рекурсивных цифровых фильтров методом билинейного Z - преобразования....	72

3.18	Расчёт рекурсивных цифровых резонаторов второго порядка.....	74
3.19	Расчёт взаимно расстроенной пары цифровых резонаторов .....	78
3.20	Определение разрядности АЦП и ЦАП при заданных отношениях сигнал-шум на выхо- дах аналогового и цифрового фильтров .....	81
3.21	Определение разрядности АЦП по шумам квантования и требованиям к АЧХ фильтра	81
3.22	Определение разрядности регистров .....	83
<b>4</b>	<b>Цифровые фазорасщепители, генераторы и преобразователи частоты.....</b>	<b>89</b>
4.1	Нерекурсивные 90 – градусные фазорасщепители.....	89
4.2	Все пропускающая цифровая цепь.....	91
4.3	Рекурсивный 90 – градусный фазорасщепитель.....	92
4.4	Генераторы пилообразных, прямоугольных, треугольных и трапецеидальных колебаний.....	94
4.5	Косинусно – синусные генераторы .....	97
4.6	Преобразователи частоты.....	98
<b>5</b>	<b>Цифровые детекторы .....</b>	<b>102</b>
5.1	Амплитудные детекторы.....	102
5.1.1	Амплитудный детектор - выпрямитель .....	102
5.1.2	Квадратурный амплитудный детектор с блоком извлечения квадратного корня.....	103
5.1.3	Синхронный амплитудный детектор с управляемым косинусно - синусным генератором .....	104
5.1.4	Синхронный амплитудный детектор с узкополосным фильтром для выделения несущей.....	105
5.2	Фазовые детекторы .....	107
5.2.1	Фазовый детектор с выходным ФНЧ.....	107
5.2.2	Квадратурный фазовый детектор .....	108
5.2.3	Квадратурный фазовый детектор с пилообразной детекторной характеристикой.....	109
5.3	Частотные детекторы.....	110
5.3.1	Автокорреляционный частотный детектор с выходным ФНЧ.....	110
5.3.2	Квадратурный автокорреляционный частотный детектор .....	111
5.3.3	Квадратурный автокорреляционный частотный детектор с внутренним амплитудным ограничением.....	112
5.3.4	Частотный детектор на цифровой линии задержки.....	113
5.3.5	Синхронно – фазовый частотный детектор.....	114
<b>6</b>	<b>Преобразование Фурье и вейвлет - преобразование.....</b>	<b>117</b>
6.1	Прямое дискретное преобразование Фурье .....	117
6.2	Обратное дискретное преобразование Фурье .....	118
6.3	Алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием во времени.....	119
6.4	Алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием по частоте .....	123
6.5	Дискретное косинусное преобразование.....	125
6.6	Вейвлет - преобразование .....	125
6.6.1	Вейвлет – преобразование аналогового сигнала.....	125
6.6.2	Дискретизация непрерывного вейвлет - преобразования .....	129
6.6.3	Дискретное вейвлет - преобразование .....	132
<b>7</b>	<b>Формирователи и демодуляторы дискретных сигналов .....</b>	<b>135</b>
7.1	Цифровой формирователь сигнала бинарной фазоразностной манипуляции (DBPSK) .	135

7.1.1 Укрупнённый алгоритм формирования сигнала DBPSK.....	135
7.1.2 Нерекурсивный ФНЧ с АЧХ вида «приподнятый косинус».....	136
7.1.3 Формирование несущей и выходного сигнала.....	138
7.2 Автокорреляционный демодулятор сигнала DBPSK.....	139
7.2.1 Укрупнённый алгоритм функционирования демодулятора.....	139
7.2.2 Автокорреляционный детектор.....	140
7.2.3 Узел синхронизации.....	141
7.2.4 Интегратор и формирователь элементарных посылок.....	143
7.3 Когерентный демодулятор сигнала DBPSK.....	143
7.3.1 Укрупнённый алгоритм функционирования когерентного демодулятора.....	143
7.3.2 Фазовый детектор и формирователь опорных колебаний.....	145
7.4 Цифровой формирователь сигнала квадратурной (четырёхпозиционной) фазоразностной манипуляции DQPSK.....	148
7.5 Автокорреляционный демодулятор сигнала DQPSK.....	151
7.6 Когерентный демодулятор сигнала DQPSK.....	155
7.7 Демодуляторы многочастотных сигналов относительной фазовой манипуляции.....	160
7.8 Формирователь сигнала минимальной частотной манипуляции.....	164
7.9 Автокорреляционный демодулятор сигналов МЧМ и гауссовской МЧМ.....	167
<b>8 Архитектура сигнальных процессоров.....</b>	<b>171</b>
8.1 Укрупнённая функциональная схема сигнального процессора.....	171
8.2 Укрупнённая функциональная схема процессора TMS320C64xx. Ядро процессора.....	172
8.3 Память программ и память данных.....	177
8.4 Периферийные устройства.....	180
8.4.1 Контроллер прямого доступа к памяти.....	180
8.4.2 Многоканальный буферизированный последовательный порт.....	187
8.4.3 Блок входов./ выходов общего назначения.....	189
8.4.4 Хост - интерфейс.....	190
8.4.5 Таймеры.....	194
8.4.6 Режимы пониженного энергопотребления.....	197
<b>9 Данные и их организация в процессоре.....</b>	<b>200</b>
9.1 Коды представления двоичных чисел в процессоре.....	200
9.1.1 Перевод положительных десятичных чисел в двоичную систему счисления.....	200
9.1.2 Прямой и дополнительный коды представления двоичных чисел.....	202
9.1.3 Перевод целого числа со знаком, представленного в дополнительном двоичном коде, в десятичную систему счисления.....	203
9.1.4 Перевод дробного числа со знаком, представленного в дополнительном двоичном коде, в десятичную систему счисления.....	204
9.2 Организация данных в процессоре.....	204
9.2.1 Формы и форматы представления данных в процессоре.....	204
9.2.2 Представление чисел с фиксированной точкой.....	205
9.2.3 Представление чисел с плавающей точкой.....	208
<b>10 Система команд и адресация данных.....</b>	<b>213</b>
10.1 Формат и структура слова команды.....	213
10.2 Непосредственная и прямая адресация данных.....	216
10.3 Косвенная адресация.....	218
10.4 Адресация циклического буфера данных.....	220
10.5 Организация циклических буферов в процессорах TMS320Cxxx.....	223
10.6 Основные типы команд процессора.....	226
10.6.1 Команды пересылок.....	236
10.6.2 Команды арифметических операций.....	229
10.6.3 Команды логических операций.....	233

10.6.4 Команды бит-манипуляций.....	234
10.6.5 Команды управления операций.....	235
Приложение А. Программа синтеза ФНЧ с линейной ФЧХ и АЧХ, задаваемой функцией без разрывов, методом ряда Фурье .....	238
Приложение Б. Программа синтеза 90 – градусного рекурсивного фазорасщепителя на N всепропускающих цепях .....	240
Приложение В. Ряд и интеграл Фурье .....	247
Приложение Г. Расчёт фильтра нижних частот типа «приподнятый косинус» .....	249
Приложение Д. Расчёт гауссовского фильтра нижних частот .....	251