

# Оглавление

<b>Глава 1. Основы программно-конфигурируемого радио</b> .....	3
1.1. Лекция. Основы программно-конфигурируемого радио .....	4
1.1.1. Понятие программно-конфигурируемого радио .....	4
1.1.2. Архитектура радиостанции ПКР .....	5
1.1.3. Современные тенденции применения ПКР .....	8
1.1.4. Эволюция радиостанций ПКР .....	11
1.1.5. Анализ структуры радиоприемника RTL-SDR .....	13
1.1.6. Реализация приемопередатчика ПКР в СПО .....	17
<b>Глава 2. Интерфейс устройства RTL-SDR в Matlab/Simulink</b> .....	22
2.1. Лабораторное занятие. Интерфейс устройства RTL-SDR в Matlab .....	22
2.1.1. Параметры объекта comm.SDRRTLReceiver .....	22
2.1.2. Анализ спектра устройством RTL-SDR в Matlab .....	25
2.1.3. Сканирование диапазона частот RTL-SDR .....	26
2.2. Лабораторное занятие. Интерфейс устройства RTL-SDR в Simulink .....	30
2.2.1. Параметры блока RTL-SDR Receiver .....	31
2.2.2. Анализ спектра устройством RTL-SDR в Simulink .....	31
2.3. Лабораторное занятие. Калибровка частоты устройства RTL-SDR .....	35
2.3.1. Передатчик USRP для калибровки частоты .....	35
2.3.2. Калибровка частоты RTL-SDR в Matlab .....	38
2.3.3. Калибровка частоты RTL-SDR в Simulink .....	41
<b>Глава 3. Интерфейс устройства USRP в Matlab/Simulink</b> .....	48
3.1. Лабораторное занятие. Интерфейс устройства USRP в Matlab/Simulink .....	48
3.1.1. Параметры объекта comm.SDRuReceiver/comm.SDRuTransmitter .....	48
3.1.2. Параметры блоков SDRu Transmitter и SDRu Receiver в Simulink .....	52
3.2. Лабораторное занятие. Калибровка частоты устройства USRP в Matlab .....	54
3.2.1. Передатчик для калибровки частоты USRP .....	54
3.2.2. Приемник для калибровки частоты USRP .....	55
3.2.3. Калибровка частоты приемника USRP .....	56
3.3. Лабораторное занятие. Калибровка частоты устройства USRP в Simulink .....	58
3.3.1. Передатчик для калибровки частоты USRP .....	58
3.3.2. Приемник для калибровки частоты USRP .....	61
3.3.3. Калибровка частоты приемника USRP .....	64
<b>Глава 4. Комплексные сигналы и спектры</b> .....	65
4.1. Лекция. Квадратурная модуляция .....	65
4.1.1. Модуляция с подавленной несущей .....	65

4.1.2. Демодуляция при фазовом сдвиге.....	66
4.1.3. Квадратурная модуляция и демодуляция в вещественной форме	67
4.1.4. Квадратурная демодуляция при фазовом сдвиге .....	69
4.1.5. Квадратурная модуляция и демодуляция в комплексной форме	70
4.1.6. Спектры квадратурной модуляции и демодуляции .....	71
4.1.7. Компенсация частотного сдвига при квадратурной демодуляции	72
4.2. Практическое занятие. Комплексные сигналы и спектры.....	73
4.2.1. Сигналы и спектры в вещественной форме.....	73
4.2.2. Сигналы и спектры в комплексной форме.....	75
4.3. Практическое занятие. Модулированные сигналы и спектры.....	79
4.3.1. Пример четырехтонального сигнала .....	79
4.3.2. Комплексный демодулированный сигнал .....	80
4.3.3. Квадратурная модуляция и демодуляция .....	84
4.3.4. Компенсация фазового и частотного сдвига при демодуляции ..	85
<b>Глава 5. Амплитудная модуляция .....</b>	<b>100</b>
5.1. Практическое занятие. Амплитудная модуляция .....	100
5.1.1. Амплитудная модуляция с подавленной несущей (AM-DSB-SC)	100
5.1.2. Амплитудная модуляция (AM-DSB-TC) .....	103
5.1.3. Однополосная амплитудная модуляция (AM-SSB).....	107
5.2. Практическое занятие. Амплитудная демодуляция .....	110
5.2.1. Демодуляция AM-DSB-SC .....	110
5.2.2. Демодуляция AM-DSB-TC.....	111
5.2.3. Некогерентная демодуляция .....	113
5.3. Лабораторное занятие. Реализация АМ передатчика на USRP ...	121
5.3.1. Реализация АМ передатчика AM-DSB-SC на USRP .....	122
5.3.2. Реализация АМ передатчика AM-DSB-TC на USRP .....	126
5.3.3. Реализация АМ передатчика AM-SSB на USRP .....	126
5.4. Лабораторное занятие. Реализация АМ приемника на RTL-SDR .	136
5.4.1. Реализация детектора огибающей AM-DSB-TC на RTL-SDR в Simulink.....	138
5.4.2. Реализация детектора огибающей AM-DSB-TC на RTL-SDR в Matlab .....	142
5.4.3. Детектирование огибающей AM-DSB-SC на RTL-SDR в Simulink	144
5.4.4. Демодуляция AM-SSB на RTL-SDR в Simulink.....	145
5.5. Лабораторное занятие. Мультиплексирование АМ сигналов.....	147
5.5.1. Организация частотного мультиплексирования.....	147
5.5.2. Реализация передатчика мультиплекса на USRP .....	150
5.5.3. Реализация приемника мультиплекса на RTL-SDR.....	154
<b>Глава 6. Фазовая автоподстройка частоты .....</b>	<b>160</b>
6.1. Практическое занятие. Постановка задачи автоподстройки частоты .....	160
6.1.1. Происхождение фазовых и частотных сдвигов.....	160
6.1.2. Когерентная и некогерентная демодуляции.....	162
6.2. Лекция. Контур фазовой автоподстройки частоты .....	167

6.2.1. Структура контура фазовой автоподстройки частоты .....	167
6.2.2. Фазовый детектор .....	168
6.2.3. Петлевой фильтр .....	169
6.2.4. Генератор, управляемый напряжением .....	170
6.2.5. Статические и астатические ошибки ФАПЧ .....	173
6.3. Практическое занятие. Модель контура ФАПЧ .....	175
6.3.1. Модель фазового детектора .....	175
6.3.2. Модель петлевого фильтра .....	178
6.3.3. Модель фазового детектора и петлевого фильтра .....	184
6.3.4. Модель контура ФАПЧ .....	186
6.4. Практическое занятие. Функционирование контура ФАПЧ .....	191
6.4.1. Линеаризованная модель контура ФАПЧ .....	191
6.4.2. Моделирование ошибок контура ФАПЧ в установившемся режиме .....	195
6.4.3. Моделирование эффекта демпинг-фактора в контуре ФАПЧ ...	196
6.4.4. Параметры функционирования контура ФАПЧ .....	197
6.5. Лекция. Передаточная характеристика контура ФАПЧ .....	200
6.5.1. Передаточная характеристика аналоговой ФАПЧ .....	200
6.5.2. Передаточная характеристика цифровой ФАПЧ .....	204
6.5.3. Переход от аналогового к цифровому контуру ФАПЧ .....	205
6.5.4. Оценка коэффициентов контура ФАПЧ .....	208
6.6. Практическое занятие. Синтез контура ФАПЧ с заданными параметрами .....	210
6.6.1. Порядок синтеза контура ФАПЧ .....	210
6.6.2. Синтез контура ФАПЧ .....	212
6.6.3. Анализ работы контура ФАПЧ .....	216
6.7. Практическое занятие. Частотная синхронизация приема АМ сигналов .....	217
6.7.1. Частотная синхронизация сигналов АМ-DSB-TC .....	218
6.7.2. Частотная синхронизация сигналов АМ-DSB-SC .....	227
6.8. Лабораторное занятие. АМ приемник на RTL-SDR с контуром ФАПЧ .....	228
6.8.1. Демодулятор сигналов АМ-DSB-TC с ФАПЧ .....	228
6.8.2. Демодулятор сигналов АМ-DSB-SC с ФАПЧ .....	231
<b>Глава 7. Цифровая манипуляция .....</b>	<b>234</b>
7.1. Практическое занятие. Цифровая манипуляция .....	234
7.1.1. Векторные диаграммы сигналов ФМ и КАМ .....	234
7.1.2. Отображение битов в символы ФМ-4 .....	237
7.1.3. Прием сигналов ФМ-4 в условиях шума .....	242
7.2. Практическое занятие. Формирующие фильтры .....	247
7.2.1. Постановка задачи использования формирующих фильтров ...	247
7.2.2. Формирующий фильтр Найквиста для устранения ИСИ .....	249
7.2.3. Формирующий фильтр типа «приподнятый косинус» .....	250
7.2.4. Согласованный прием сигналов .....	255

7.2.5. Уровень внеполосных излучений .....	255
7.2.6. Уровень межсимвольной интерференции .....	258
7.2.7. Согласованная фильтрация сигналов ФМ-4 .....	261
7.3. Практическое занятие. Цифровое преобразование частоты .....	263
7.3.1. Постановка задачи цифрового преобразования частоты .....	263
7.3.2. Повышающее преобразование частоты .....	266
7.3.3. Понижающее преобразование частоты .....	274
7.4. Практическое занятие. Частотная синхронизация .....	278
7.4.1. Постановка задачи частотной синхронизации .....	278
7.4.2. Частотная синхронизация с переменной частотой демодуляции .	279
7.4.3. Частотная синхронизация с постоянной частотой демодуляции .	282
7.5. Лабораторное занятие. Цифровая манипуляция в радиозфере ...	284
7.5.1. Формирующий фильтр в передатчике USRP .....	284
7.5.2. Согласованный фильтр в приемнике RTL-SDR .....	288
7.5.3. Передатчик для оценки частотного сдвига .....	290
7.5.4. Приемник для оценки частотного сдвига .....	295
7.5.5. Частотная и символьная синхронизация .....	298
7.6. Лабораторное занятие. Цифровая манипуляция в эмуляторе ка- нала .....	299
7.6.1. Стенд эмуляции радиоканала .....	299
7.6.2. Эмуляция радиоканала связи с АВГШ .....	300
7.6.3. Эмуляция многолучевого радиоканала .....	306
Обозначения и сокращения .....	309
Литература .....	310