

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Э. В. Семенов

УСТРОЙСТВА ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Учебно-методическое пособие
по практическим занятиям, лабораторным работам и самостоятельной работе

Томск
2024

УДК 621.396.62
ББК 32.884.1
С-30

Семенов Эдуард Валерьевич

С-30 Семенов Э.В. Устройства приема и обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. – Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 51 с.

Пособие предназначено для методического обеспечения практических занятий, лабораторных работ, а также самостоятельной работы по дисциплинам «Устройства приема обработки сигналов», «Радиоприемные устройства систем радиосвязи и радиодоступа» и аналогичных студентами бакалавриата радиотехнических специальностей.

Одобрено на заседании каф. РСС протокол №8 от 16.05.2024.

УДК 621.396.62
ББК 32.884.1

© Семенов Э.В., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Области применения, виды принимаемых сигналов и задачи УПОС	6
1.1 Краткие сведения из лекционного курса	6
1.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях	6
1.3 Расчетные задания (задачи)	6
1.4 Контрольная работа	8
1.5 Указания к самостоятельной работе	8
2 Структурные схемы приемников	9
2.1 Краткие сведения из лекционного курса	9
2.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных и физических моделях	9
2.3 Контрольная работа (письменный вариант)	13
2.4 Контрольная работа (тесты)	13
2.5 Краткие сведения по лабораторной работе	15
2.6 Указания к самостоятельной работе	15
3 Узлы устройств приема и обработки сигналов	16
3.1 Краткие сведения из лекционного курса	16
3.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях	17
3.3 Расчетные задания (задачи)	19
3.4 Контрольная работа (письменный вариант)	19
3.5 Контрольная работа (тесты)	21
3.6 Руководства к лабораторным работам	23
3.7 Указания к самостоятельной работе	29
4 Автоматические регулировки в устройствах приема и обработки сигналов	31
4.1 Краткие сведения из лекционного курса	31
4.2 Контрольная работа (письменный вариант)	32
4.3 Контрольная работа (тесты)	32
4.4 Указания к самостоятельной работе	35
5 Особенности приема сигналов, передаваемых в цифровой форме	36
5.1 Краткие сведения из лекционного курса	36
5.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях	37
5.3 Расчетные задания (задачи)	37
5.4 Контрольная работа (письменный вариант)	38
5.5 Контрольная работа (тесты)	39
5.6 Краткие сведения по лабораторным работам	44
5.7 Указания к самостоятельной работе	44
6 Особенности приема шумоподобных сигналов	45
6.1 Краткие сведения из лекционного курса	45
6.2 Расчетные задания (задачи)	45
6.3 Контрольная работа (тест)	46
6.4 Указания к самостоятельной работе	47
7 Экзаменационные вопросы	48
7.1 Области применения, виды принимаемых сигналов и задачи УПОС	48
7.2 Структурные схемы приемников	48
7.3 Элементы и узлы УПОС	48
7.4 Автоматические регулировки в УПОС	48
7.5 Особенности цифровых УПОС	48
7.6 Особенности УПОС шумоподобных сигналов (ШПС)	49
7.7 Разнесенный прием радиосигналов	49

Список литературы	50
--------------------------------	-----------

ВВЕДЕНИЕ

Целью дисциплины является формирование у студентов багажа знаний и навыков, необходимых для проектирования устройств приема и обработки сигналов (УПОС).

Лекционный курс дисциплины [1] предусматривает:

- изучение особенностей входных сигналов приемников;
- изучение основных структурных схем приемников;
- изучение принципа действия и устройства отдельных узлов приемников;
- изучение применяемых в радиоприемных устройствах систем автоматического регулирования;
- изучение особенностей приемников цифровых сигналов;
- изучение особенностей приемников шумоподобных сигналов.

В курсе лекций рассматриваются также вопросы качества радиоприемных устройств, характеристика шумов и нелинейных искажений.

В качестве дополнительной литературы по вопросам цифровой связи рекомендуется книга [2], по системам связи с шумоподобными сигналами – [3].

Практические занятия посвящены закреплению лекционного материала, формированию умений и навыков расчета как общих характеристик радиоприемных устройств, так и расчета отдельных узлов приемников. На практических занятиях предусмотрено решение задач, выполнение текстовых контрольных работ и тестов на знание лекционного материала.

В курсе предусмотрено выполнение четырех лабораторных работ. В данном пособии приведены их краткие описания и даны ссылки на руководства для их выполнения.

Аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена. Перечень вопросов к экзамену приведен в разделе 7.

1 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ, ВИДЫ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ И ЗАДАЧИ УПОС

1.1 Краткие сведения из лекционного курса

Приемники используются в широкополосных, радиорелейных, сотовых, микросотовых системах связи, а также в системах беспроводного доступа к компьютерной информации, в системах навигации и радиолокации.

Задачами радиоприемника является выделение нужного радиосигнала по какому-либо отличительному признаку (частоте, времени или форме) с возможностью перестройки на разные сигналы, усиление до нужного уровня, восстановление синхросигнала из входного сигнала. При этом вносимые в сигнал искажения не должны превышать заданных величин.

Входные сигналы радиоприемников в настоящее время модулируются (манипулируются) цифровыми сигналами по амплитуде и/или фазе (частоте). Чаще всего используется либо только фазовая/частотная манипуляция (BPSK, QPSK, FSK, MSK и т.д.), либо сочетание фазовой и амплитудной (QAM). В зависимости от величины дискретного изменения фазы выделяют бинарную (π), квадратурную ($\pi/2$) и манипуляцию с более мелким шагом ($\pi/4$ и т.д.). При этом сигнальное значение может иметь либо абсолютная фаза сигнала, либо изменение фазы по сравнению с предыдущим состоянием (например, DQPSK). Частотные (FSK) и фазовые (PSK) виды манипуляций различаются тем, что при частотной манипуляции не допускается изменение амплитуды сигнала (даже паразитное между моментами регистрации цифровых символов). Хотя и в фазовых видах манипуляции иногда применяют прием для снижения паразитной амплитудной модуляции (смещение момента переключения цифровых символов в квадратурных каналах, OQPSK). Для обеспечения устойчивости к многолучевому распространению выделенной системе связи частотный диапазон иногда разделяют на поддиапазоны, в которых синхронно передают информацию на ряде ортогональных поднесущих (OFDM).

В последнее время, также, начинают применяться системы связи, в которых используется время-импульсная модуляция. При этом в эфир передаются короткие импульсы без несущей, положение которых во времени является сигнальным признаком.

1.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях

На занятии преподаватель демонстрирует модель системы связи в среде LabVIEW (рисунки 1.1–1.2), в которой учитываются шумы в канале передачи. Основная задача: продемонстрировать действительный уровень полезного сигнала в отношении к широкополосным шумам и помехам в реальных условиях приема. Вы можете выполнить эту работу самостоятельно, если реализуете приведенную на рисунке 1.1 схему в среде LabVIEW.

1.3 Расчетные задания (задачи)

Задача 1

Дано: полоса радиосигнала в эфире 12.6 кГц (± 6.3 кГц относительно несущей). Требуемая избирательность по соседнему каналу 50 дБ при расстройке 30 кГц.

Найти порядок фильтра сосредоточенной селекции, обеспечивающий заданную избирательность.

Задача 2

Какую избирательность по соседнему каналу обеспечит фильтр четвертого порядка при использовании его в системе с амплитудной модуляцией с верхней граничной частотой 12.5 кГц при расстройке 50 кГц?

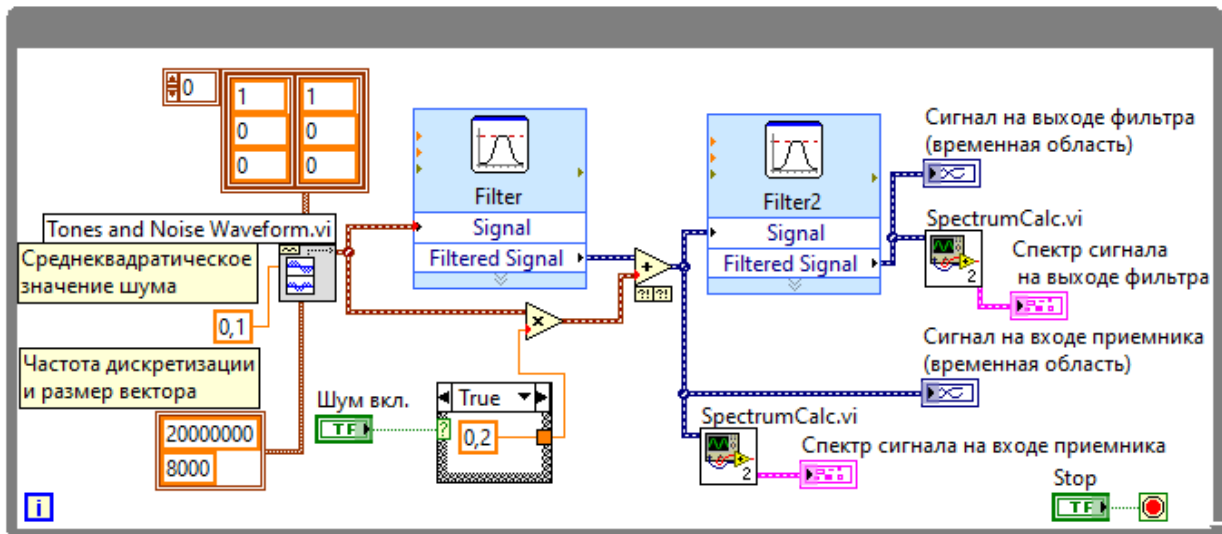


Рисунок 1.1 – Функциональная схема системы связи с шумами в канале передачи (среда LabVIEW)

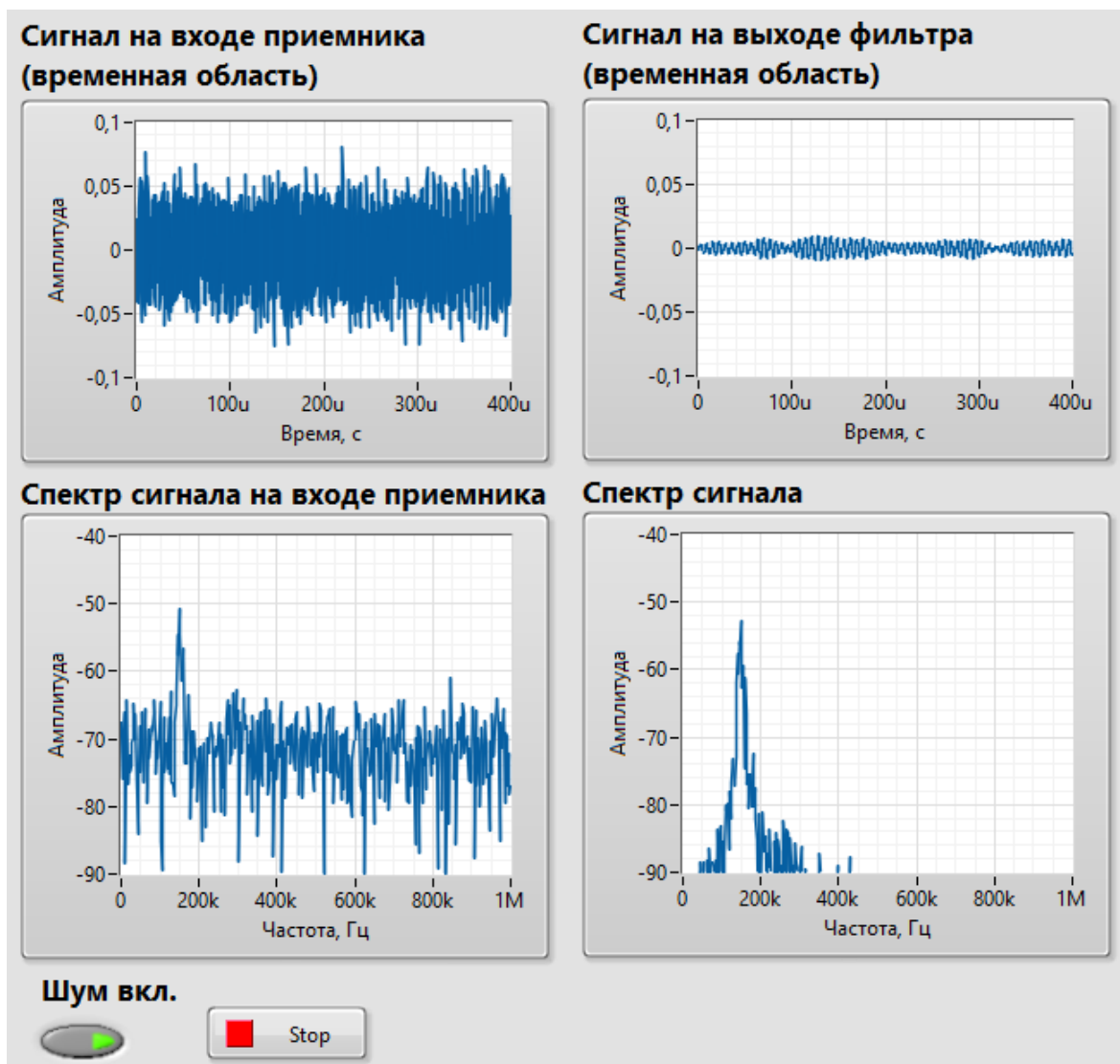


Рисунок 1.2 – Осциллограмма и спектр входного сигнала приемника в присутствии полезного сигнала и широкополосного шума

1.4 Контрольная работа

Вариант 1

1. Основные задачи устройств приема и обработки сигналов.
2. Что такое чувствительность?
3. Семейство форматов модуляции PSK.
4. Семейство форматов модуляции CPM.

Вариант 2

1. По каким информативным признакам может быть селектирован сигнал передатчика?
2. Что такое избирательность?
3. Семейство форматов модуляции FSK.
4. Модуляция OFDM.

1.5 Указания к самостоятельной работе

Задача самостоятельной работы состоит в подготовке к контрольной работе. Для этого можно использовать материалы конспекта лекций [1].

На самостоятельную подготовку преподавателем может быть, также, вынесено решение задач (из подраздела 1.3 или аналогичных).

2 СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ПРИЕМНИКОВ

2.1 Краткие сведения из лекционного курса

Структурно приемники бывают без преобразования частоты (прямого детектирования и прямого усиления), либо с предварительным преобразованием частоты на промежуточную или нулевую частоту (супергетеродины и приемники прямого преобразования).

Приемники прямого детектирования и прямого усиления используются редко, поскольку обеспечить нужную избирательность и усиление непосредственно на радиочастоте весьма сложно (особенно при необходимости перестройки по диапазону).

В супергетеродинных приемниках входная радиочастота переносится на промежуточную в преобразователе частоты, который состоит из гетеродина (маломощного генератора) и перемножителя. При этом основная избирательность и усиление реализуются на промежуточной частоте, что позволяет получить высокую избирательность и чувствительность во всем диапазоне перестройки, но для супергетеродинов характерно появление зеркального канала приема, подавить который можно только до преобразования частоты (во входной цепи или усилителе радиочастоты).

Для эффективного подавления зеркального канала промежуточную частоту иногда выбирают выше максимальной частоты настройки (инфрадин) или выполняют несколько преобразований частоты последовательно понижая промежуточную частоту.

Перенос частоты может выполняться не на промежуточную, а сразу на нулевую частоту. Такие приемники называются приемниками прямого преобразования. Зеркального канала в них нет, а основное усиление и избирательность обеспечиваются на частоте модуляции, что очень удобно. Однако недостатком таких приемников является необходимость обеспечения равенства частоты гетеродина частоте принимаемого сигнала с точностью до фазы, что может быть выполнено только системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Синхронизация в ФАПЧ обеспечивается только начиная с определенного уровня сигнала, что ограничивает чувствительность таких приемников.

Альтернативной реализацией приемников прямого преобразования является использование квадратурного преобразователя частоты, в котором отклонение фазы гетеродина приводит к ослаблению сигнала в синфазном канале, но усилению в квадратурном. Совместная обработка выходных сигналов синфазного и квадратурного канала позволяет нормально выполнить как амплитудное, так и фазовое детектирование.

2.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных и физических моделях

На практических занятиях преподаватель может использовать иллюстративные примеры, описанные в нижеследующих пунктах.

2.2.1 Работа преобразователя частоты на функциональном уровне и образование зеркального канала приема

Преподаватель на занятии демонстрирует схему, приведенную на рисунке 2.1 (AWR Design Environment, Visual System Simulator). Нужно продемонстрировать, что при частоте принимаемого сигнала 1000 МГц (блок А1) и верхней настройке гетеродина 1030 МГц (блок А3) на выходе фильтра промежуточной частоты А4 присутствует спектр принимаемого сигнала в окрестности 30 МГц (рисунок 2.2). Затем демонстрируется, что сигнал таким же уровнем на выходе А4 получается в том случае, если частоту принимаемого сигнала установить равной 1060 МГц.

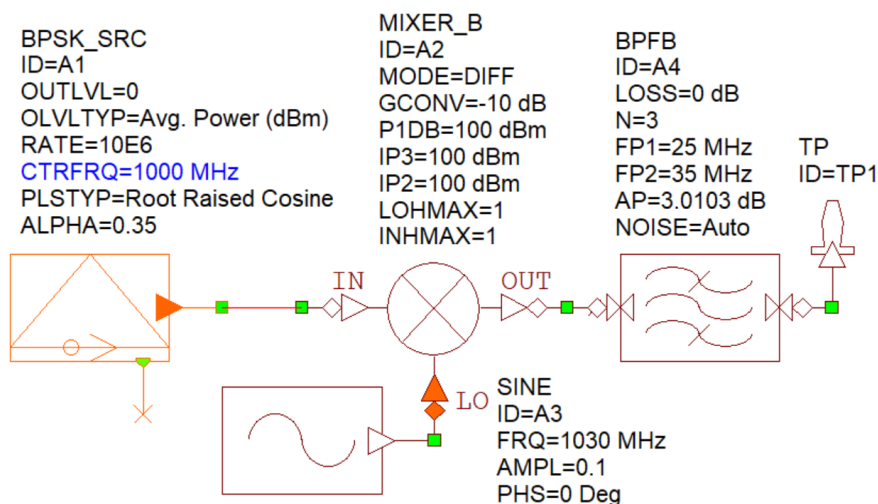


Рисунок 2.1 – Функциональная схема канала связи с преобразователем частоты и фильтром на промежуточной частоте

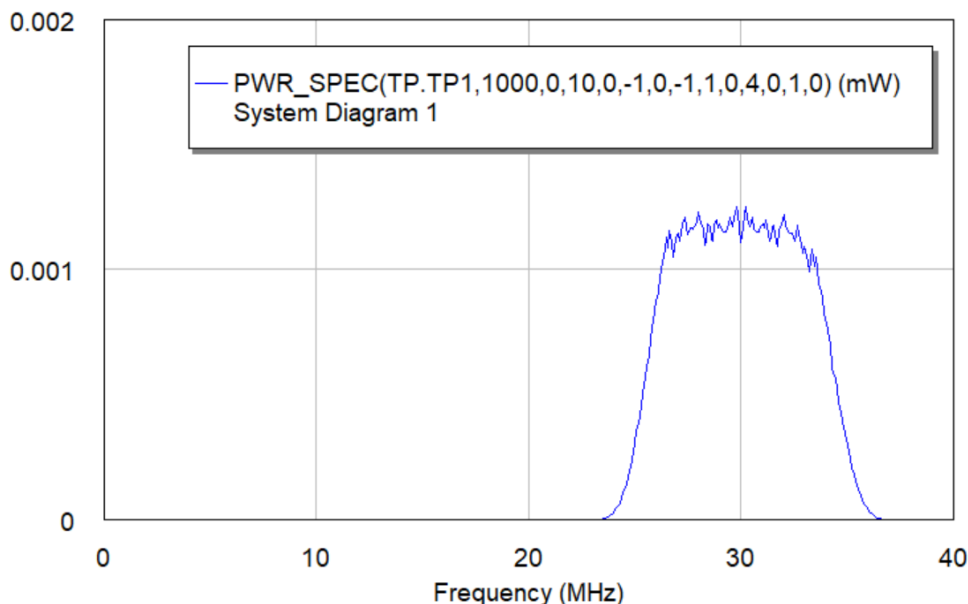


Рисунок 2.2 – Спектр сигнала на выходе фильтра промежуточной частоты

2.2.2 Работа приемника прямого преобразования с квадратурным каналом приема

Демонстрируется схема приемника прямого преобразования, приведенная на рисунке 2.3. На вход приемника подключен генератор тестового сигнала (блоки A1 и A2). Генератор вырабатывает сигнал, бинарно манипулированный по амплитуде по случайному закону.

Обратите внимание, что сигнал гетеродина в данной схеме имеет погрешность синхронизации по частоте со входным сигналом (частота входного сигнала 1000 МГц, частота гетеродина 1000.1 МГц). Это позволяет продемонстрировать необходимость такой синхронизации, если в приемнике отсутствует квадратурный канал приема. На рисунке 2.4 видно, что сигнал на выходе синфазного канала (синяя кривая) постоянно меняет амплитуду и полярность. Это является следствием меняющейся разности фаз на входах смесителя A3. Сигнал в квадратурном канале (пурпурная кривая на рисунке 2.4) также меняет амплитуду и полярность. Но происходит это так, что сумма квадратов сигналов на выходе обоих каналов остается постоянной (рисунок 2.5). Таким образом получается, что схема на рисунке 2.3 нечувствительна к фазовой (и небольшой частотной) рассинхронизации гетеродина относительно входного сигнала.

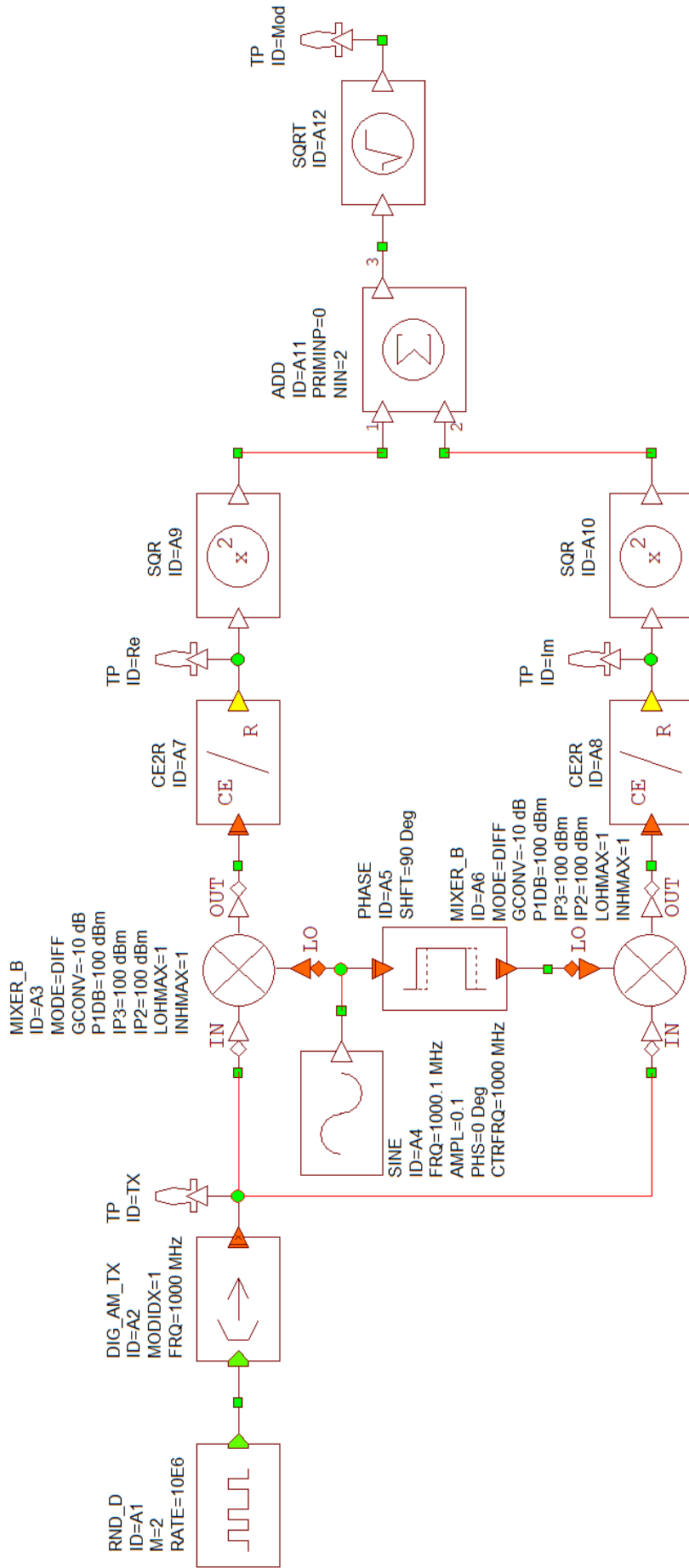


Рисунок 2.3 – Функциональная схема приемника прямого преобразования с квадратурным каналом приема

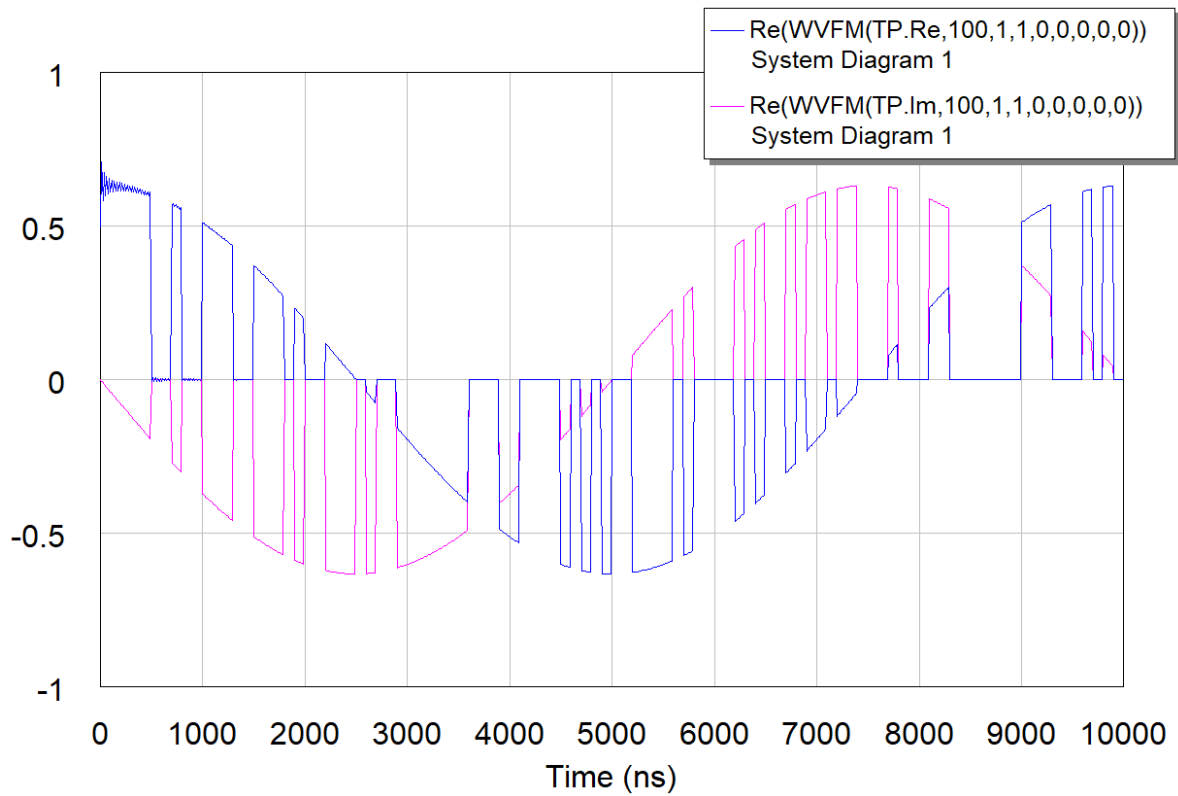


Рисунок 2.4 – Сигналы на выходах преобразователей частоты в квадратурных каналах

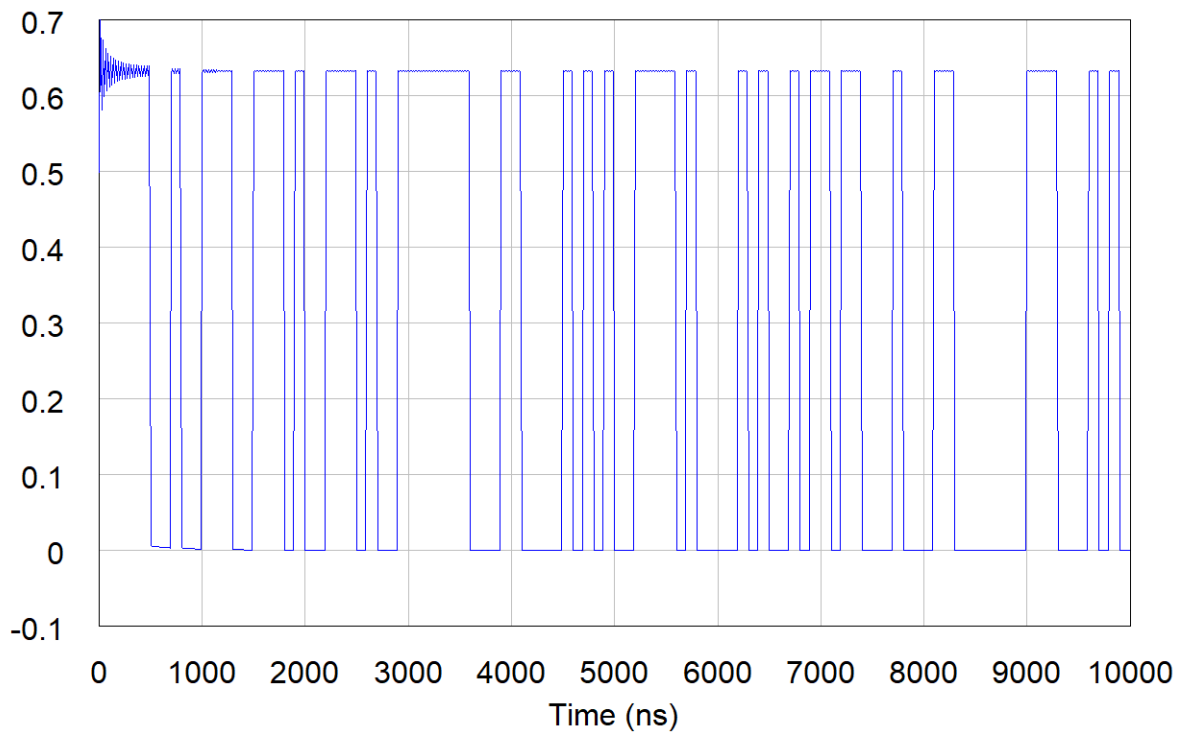


Рисунок 2.5 – Сигнал на выходе схемы суммирования квадратов выходных сигналов преобразователей частоты квадратурных каналов

2.3 Контрольная работа (письменный вариант)

Вариант 1

1. Структурная схема приемника прямого детектирования, его преимущества и недостатки.
2. Возможные варианты настройки частоты гетеродина относительно частоты сигнала.
3. Побочные каналы приема и борьба с ними.
4. Супергетеродины с несколькими преобразованиями частоты.
5. Приемник прямого преобразования без фазовой автоподстройки частоты гетеродина.

Вариант 2

1. Структурная схема приемника прямого усиления. Его преимущества и недостатки.
2. Структурная схема супергетеродинного приемника. Его преимущества и недостатки.
3. Структурная схема и основные особенности инфрадина.
4. Структурная схема приемника прямого преобразования, его преимущества и недостатки.
5. Программно-определяемое радио.

2.4 Контрольная работа (тесты)

Вопрос 1. Приемник прямого детектирования состоит из...

- 1) усилителя, входного фильтра и детектора;
- 2) входного фильтра, усилителя и детектора;
- 3) входного фильтра, усилителя, преобразователя частоты и детектора;
- 4) только из детектора, на вход которого подается сигнал с антенны;
- 5) входного фильтра и детектора;

Вопрос 2. Приемник прямого усиления состоит из...

- 1) детектора, на вход которого подается сигнал с антенны;
- 2) полосового фильтра, усилителя, преобразователя частоты и детектора;
- 3) полосового фильтра, усилителя и детектора;
- 4) усилителя, полосового фильтра и детектора;
- 5) полосового фильтра и детектора.

Вопрос 3. В чем состоит главный недостаток приемника прямого усиления?

- 1) сложно обеспечить приемлемую избирательность по соседнему каналу приема;
- 2) сложно обеспечить необходимое усиление;
- 3) сложно обеспечить избирательность по зеркальному каналу приема.
- 4) образуется прямой канал приема;
- 5) образуется зеркальный канал приема.

Вопрос 4. Каков главный смысл переноса принимаемого сигнала на другую частоту?

- 1) проще обеспечить нужное усиление;
- 2) фильтр, обеспечивающий избирательность по соседнему каналу, можно сделать высококачественным, так как снижаются требования к его добротности;
- 3) усилители получают с большим коэффициентом полезного действия;
- 4) проще обеспечить подавление зеркального канала приема;
- 5) фильтр, обеспечивающий избирательность по соседнему каналу, можно сделать высококачественным, так как его не нужно перестраивать.

Вопрос 5. Если частота принимаемого сигнала 100 МГц и нужно преобразовать его на промежуточную частоту 10 МГц, какую нужно выбрать частоту гетеродина? Преобразование на высших гармониках не использовать.

Вопрос 6. Каков главный недостаток приемников с преобразованием частоты?

- 1) гетеродин является источником паразитного электромагнитного излучения;
- 2) сложно обеспечить избирательность по соседнему каналу приема;
- 3) усложняется схема и конструкция;
- 4) сложно обеспечить перестройку по диапазону принимаемых частот;
- 5) возникают побочные каналы приема.

Вопрос 7. Где в супергетеродине обеспечивают избирательность по соседнему каналу, а где по зеркальному?

- 1) избирательность по соседнему и зеркальному каналам обеспечивают до преобразования частоты;
- 2) избирательность по зеркальному каналу обеспечивают после преобразования частоты, а по соседнему – до;
- 3) избирательность по соседнему и зеркальному каналам обеспечивают после преобразования частоты;
- 4) избирательность по соседнему каналу обеспечивают после преобразования частоты, а по зеркальному – до.

Вопрос 8. Где в супергетеродине выполняют основное усиление сигнала?

- 1) на нулевой частоте;
- 2) на частоте входного сигнала;
- 3) на промежуточной частоте;
- 4) на частоте зеркального канала;
- 5) на частоте модуляции;

Вопрос 9. Что такое инфрадин?

- 1) генератор сигнала в приемнике для переноса частоты;
- 2) приемник с нулевой промежуточной частотой;
- 3) супергетеродинный приемник с низкой промежуточной частотой;
- 4) супергетеродинный приемник с промежуточной частотой выше верхней граничной частоты настройки.

Вопрос 10. Какое главное преимущество получается при нескольких преобразованиях частоты?

- 1) наивысшая избирательность по зеркальному каналу;
- 2) высокую избирательность по соседнему и зеркальному каналам можно получить на низкодобротных фильтрах;
- 3) несколько зеркальных каналов приема;
- 4) можно получить высокую избирательность по соседнему и зеркальному каналам;
- 5) наивысшая избирательность по соседнему каналу;

Вопрос 11. В чем основное отличие приемника прямого преобразования от супергетеродина?

- 1) в приемнике прямого преобразования промежуточная частота выбирается равной частоте принимаемого сигнала;
- 2) в приемнике прямого преобразования сигнал поступает напрямую на детектор;

- 3) в приемнике прямого преобразования обязательно нужна синхронизация гетеродина по фазе со входным сигналом;
- 4) приемник прямого преобразования имеет нулевую промежуточную частоту;
- 5) в приемнике прямого преобразования промежуточная частота выбирается выше верхней граничной частоты настройки.

Вопрос 12. Что будет при нарушении фазовой синхронизации гетеродина с принимаемым сигналом в приемнике прямого преобразования без квадратурного канала?

- 1) появится зеркальный канал приема;
- 2) уменьшится избирательность приемника;
- 3) приемник то будет работать, то нет в зависимости от изменяющегося соотношения фаз сигнала и гетеродина;
- 4) ничего особенного;
- 5) уменьшится чувствительность приемника.

Вопрос 13. Что даст применение квадратурного преобразователя частоты в приемнике прямого преобразования?

- 1) можно обойтись без фазовой синхронизации сигнала гетеродина с принимаемым сигналом;
- 2) ничего, только перерасход компонентов;
- 3) большую избирательность по соседнему каналу;
- 4) можно принимать квадратурные виды модуляции при обязательной синхронизации гетеродина с принимаемым сигналом;
- 5) большую чувствительность, так как шумы в ортогональных каналах некоррелированы.

2.5 Краткие сведения по лабораторной работе

Лабораторная работа по данной теме посвящена изучению канала связи, построенного на цифровом трансивере National Instruments серии USRP-2900. Руководство для лабораторной работы приведено в [4].

В лабораторной работе создается программное обеспечение для управления приемником, построенным по схеме программно-определяемого радио. Затем осуществляется радио-прием УКВ-ЧМ станций в диапазоне 88...108 МГц с построением их спектра, IQ-диаграмм и осциллограмм.

Затем нужно построить программу, управляющую передатчиком и ранее созданным приемником принять сигнал собственного передатчика.

2.6 Указания к самостоятельной работе

На самостоятельную работу выносятся подготовка к текстовой контрольной работе при очном изучении курса или подготовка к тесту и выполнение теста при дистантном обучении.

Кроме того, на самостоятельное изучение может быть вынесено изучение руководства к лабораторной работе [4] для ее более быстрого и результативного выполнения на занятии.

3 УЗЛЫ УСТРОЙСТВ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

3.1 Краткие сведения из лекционного курса

Начинается приемный тракт с антенны, которая может быть как встроенной в приемник, так и внешней. По наличию реактивной составляющей импеданса антенны бывают настроенные и ненастроенные. Ненастроенные антенны могут иметь либо индуктивный характер реактанса (магнитные антенны), либо емкостной (короткие штыри). Если импеданс настроенной антенны равен входному сопротивлению приемника, то обеспечивается согласованный по импедансу режим работы. Основным характеристическим параметром антенны является эффективная площадь или действующая длина.

Сигнал антенны подается на входную цепь, в задачи которой входит согласование с импедансом антенны, а также фильтрация побочных каналов приема и мощных помех, способных вызвать насыщение усилителя радиочастоты (УРЧ). Входная цепь представляет собой резонансную систему, частично (для получения нужной добротности) связанную с антенной и УРЧ. Входные цепи могут быть плавно перестраиваемыми по частоте или (в последнее время) переключаемыми. Плавная перестройка обычно осуществляется варикапами.

Далее сигнал передается на УРЧ. Главным требованием к УРЧ (точнее к первому транзистору УРЧ) являются малые шумы, поскольку после него сигнал имеет уже больший уровень, в сравнении с которым шумы последующих каскадов не имеют существенного значения. Шумы связаны с наличием случайной компоненты движения электрических зарядов (ненулевой температурой) и пропорциональны температуре по мощности. Для характеристики шумов поэтому используют так называемую шумовую температуру. Это эффективная величина, которая может быть как равна действительной температуре элемента, так и отличаться от нее в большую или меньшую сторону. С шумовой температурой однозначно связан коэффициент шума, который показывает, насколько мощность шумов на выходе четырехполосника больше мощности шумов на выходе шумящего четырехполосника с такой же АЧХ.

С УРЧ сигнал подается на преобразователь частоты, который состоит из перемножителя (смесителя) и маломощного генератора (гетеродина). В результате перемножения двух гармонических сигналов образуются разностная и суммарная комбинационная частоты, что позволяет переносить частоту радиосигнала на промежуточную или нулевую частоту выбором частоты гетеродина. Смесители выполняются на нелинейных элементах: диодах, транзисторах и др., крутизна амплитудной характеристики которых может меняться под действием внешнего (гетеродинного) сигнала.

Преобразователи частоты могут выполняться с двумя квадратурными каналами, например, для демодуляции квадратурных видов модуляции или для подавления зеркального канала приема фазовым методом.

Преобразователи частоты, как и усилители, являются источниками нелинейных искажений в приемниках, которые проявляются либо как непропорциональное изменение амплитуды выходного сигнала при линейном изменении амплитуды входного, либо в виде искажения формы гармонического сигнала. В первом случае для характеристики искажений используют точку компрессии, указываемую на амплитудной характеристике, во втором – точку пересечения, показывающую виртуальный уровень сигнала, при котором уровень высшей гармоники равен уровню первой гармоники.

Гетеродин представляет собой маломощный автогенератор (усилитель с положительной обратной связью). В цепь обратной связи включается резонансная цепь, определяющая частоту генерации. Часто в качестве резонатора используют кварцевую пластину, которая имеет два резонанса: последовательный между ее массой и гибкостью и параллельный между ее массой и электрической емкостью. Собственно автогенератор обычно делается на фик-

сированную частоту, а нужные частоты получаются ее умножением в ФАПЧ или умножителях частоты.

После преобразователя частоты сигнал поступает на фильтр сосредоточенной селекции (ФСС). Он определяет избирательность приемника по соседнему каналу и часто выполняется как пьезоэлектрический фильтр на объемных (ОАВ) или поверхностных волнах (ПАВ). Резонаторы в фильтрах на ОАВ не отличаются по принципу действия от кварцевых резонаторов для автогенераторов. Фильтры на ПАВ состоят из возбуждителя и приемника поверхностной волны, причем последний по структуре представляет собой, фактически, трансверсальный фильтр. Если промежуточная частота низкая или нулевая, то ФСС выполняется, как правило, как активный фильтр.

Завешает линейный тракт приемника усилитель промежуточной частоты (УПЧ) или частоты модуляции (УЧМ). Главное требование к нему – коэффициент усиления, который позволит входной сигнал заданного уровня довести до уровня, достаточного для работы детектора или АЦП.

С выхода УПЧ/УЧМ сигнал может подаваться либо на выход приемника (в приемниках прямого преобразования), либо на фазовый/частотный/амплитудный детектор, либо (чаще) на аналого-цифровой преобразователь.

3.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях

Основным оригинальным элементом современных приемников, отличающих их от остальных устройств, является преобразователь частоты.

Преобразователь частоты всегда выполняется на основе нелинейных элементов. Простейший преобразователь частоты можно выполнить на одном диоде (рисунок 3.1).

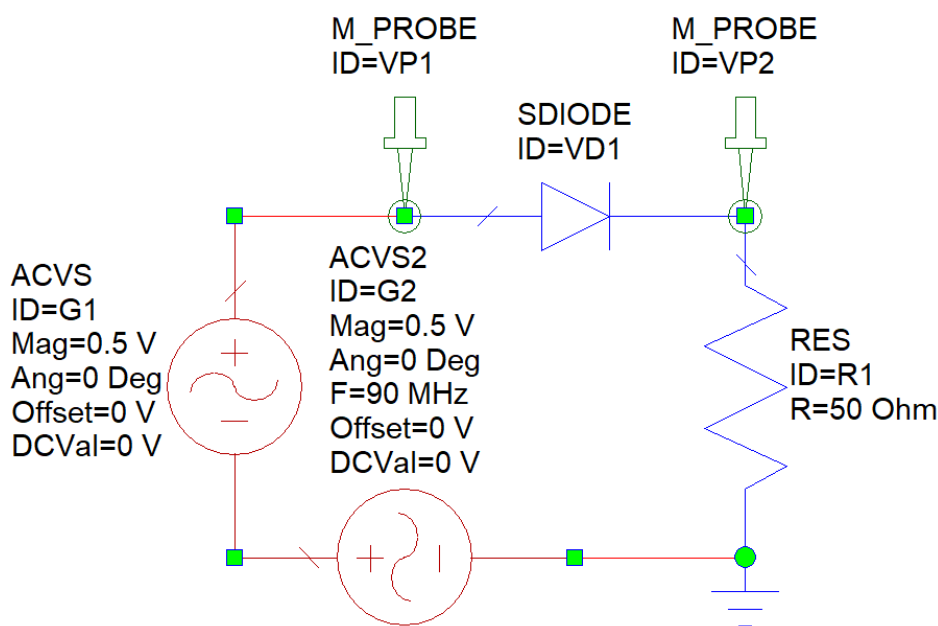


Рисунок 3.1 – Простейший преобразователь частоты на одном диоде

Входной сигнал моделируется генератором G1. Его частота системно установлена равной 100 МГц. Второй генератор G2 моделирует гетеродин с нижней настройкой (90 МГц). Если просуммировать эти сигналы и подать на элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой (VD1), то они частично перемножатся и на нагрузке диода (резистор R1) будут сигналы с суммарной и разностной частотами.

Происходит это следующим образом. Сумма двух сигналов с близкими частотами дает сигнал с биениями по амплитуде (рисунок 3.2, синяя кривая). Диод открывается только

положительными полуволнами сигнала, причем тем больше, чем больше напряжение входного сигнала (черная кривая). В этом сигнале, очевидно, появляется низкочастотная составляющая с разностной частотой.

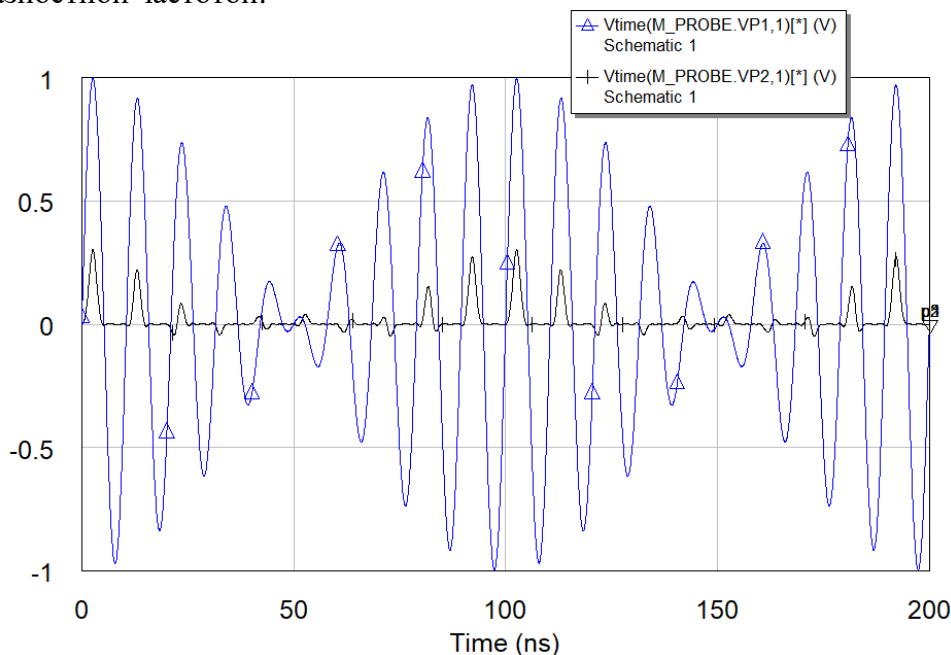


Рисунок 3.2 – Осциллограммы сигналов на входе и выходе диодного смесителя

Дополнительно убедиться в наличии разностной частоты на выходе преобразователя частоты можно по спектру сигнала на резисторе R1 (рисунок 3.3). Видно присутствие исходных частот 90 и 100 МГц (преобразователь частоты не является балансным), а также разностной частоты 10 МГц. Кроме того, в таком простом преобразователе входные сигналы умножаются и сами на себя (возводятся в квадрат). В результате появляется постоянная составляющая («нулевая разностная частота»), что тоже видно на спектре. Сигнал разностной частоты также возводится в квадрат, что приводит к появлению второй гармоники разностной частоты (20 МГц).

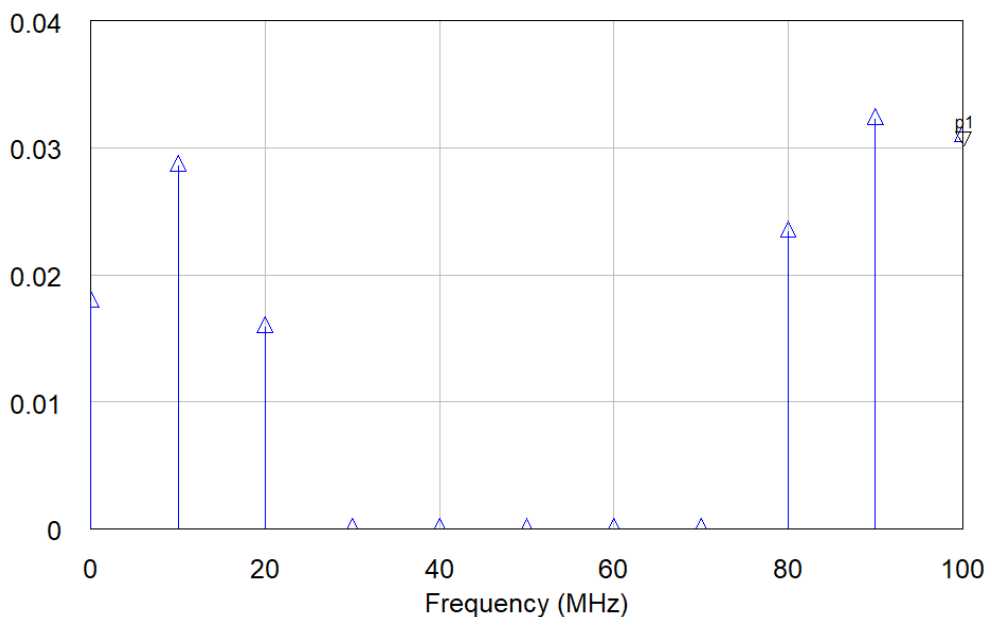


Рисунок 3.3 – Спектр сигнала на выходе однодиодного преобразователя частоты

3.3 Расчетные задания (задачи)

Задача 1

Дано: полоса частот сигнала в эфире 37.5 МГц, частота настройки 150 МГц, сопротивление антенны 100 Ом, входная проводимость усилителя радиочастоты 5 мСм. Входная цепь выполнена одноконтурной, емкость контура 20 пФ, собственная добротность 20.

Найти: коэффициенты включения антенны и малошумящего усилителя в контур, обеспечивающие максимальную передачу мощности от антенны к усилителю.

Задача 2

Дано: полоса частот радиосигнала в эфире 10 МГц, частота настройки 100 МГц. Входная цепь выполнена одноконтурной, индуктивность контура 10 мкГн, собственная добротность контура 100, входная проводимость усилителя радиочастоты 20 мСм, сопротивление антенны 50 Ом.

Найти: коэффициенты включения антенны и усилителя радиочастоты в контур, обеспечивающие максимальную передачу мощности от антенны к усилителю.

Задача 3

Дано: реальная чувствительность приемника 25 мкВ, отношение сигнал/шум 8 дБ, полоса сигнала в эфире 64 МГц, волновое сопротивление тракта 50 Ом.

Найти: коэффициент шума приемника в дБ.

Задача 4

Дано: полоса сигнала в эфире 512 кГц, отношение сигнал шум 15 дБ, коэффициент шума радиоприемного тракта 3 дБ, волновое сопротивление 50 Ом.

Найти: реальную чувствительность приемника.

Задача 5

Дано: шумовая температура приемника 181 К, входное волновое сопротивление приемника 50 Ом.

Найти: пороговую чувствительность приемника для полосы сигнала 1 МГц.

Задача 6

Дано: точка пересечения третьего порядка для радиоприемника составляет 27 дБм по выходу.

Найти: коэффициент третьей гармоники (в процентах) для уровня полезного сигнала на выходе 7 дБм.

Задача 7

Дано: точка пересечения второго порядка для радиоприемника составляет 20 дБм по выходу.

Найти: уровень первой гармоники выходного сигнала, если коэффициент второй гармоники составляет 0.1%.

Задачи можно выбирать также из сборника задач [5].

3.4 Контрольная работа (письменный вариант)

Вариант 1

1. Перечень основных функциональных узлов приемника.

2. При расчете одноконтурной входной цепи что рассчитывается и исходя из каких основных критериев?

3. Основные источники шума в УПОС. Какие каскады УПОС в наибольшей степени влияют на собственные шумы приемника.

4. Схемотехника УПЧ.

5. Разновидности и схемотехника диодных преобразователей частоты.

6. Автогенераторы с кварцевыми резонаторами.

7. Коэффициент прямоугольности.

8. Зависимость АЧХ двухконтурного фильтра от коэффициента связи контуров.

9. Разновидности фильтров по физическому исполнению.

Вариант 2

1. Основные разновидности приемных антенн.

2. Расчетные формулы для коэффициентов включения контура входной цепи.

3. Как количественно характеризуют собственные шумы приемника?

4. Назначение и принцип действия преобразователей частоты.

5. Структурная схема и принцип действия преобразователей частоты с фазовым давлением зеркального канала.

6. Что такое обратное преобразование шумов гетеродина?

7. Особенности и недостатки распределенной селекции на одинаково настроенных контурах.

8. Сосредоточенная основная селекция.

9. Устройство пьезоэлектрических фильтров сосредоточенной селекции на объемных акустических волнах.

Вариант 3

1. Задачи и параметры входных цепей.

2. Особенности перестройки входной цепи по диапазону. Что такое укороченная и удлиненная антенная цепь?

3. Что такое пороговая и реальная чувствительность приемника?

4. Нелинейные искажения в преобразователях частоты и их характеристика.

5. Структурная схема и основные параметры автогенератора.

6. Синтезаторы частоты.

7. Распределенная селекция на расстроенных контурах.

8. Основные технические требования к фильтрам сосредоточенной селекции.

9. Устройство, принцип действия и проектирование пьезоэлектрических фильтров на поверхностных акустических волнах.

Вариант 4

1. Варианты схемотехнической реализации входных цепей.

2. Основные требования к УРЧ и параметры УРЧ.

3. Схемотехника УРЧ.

4. Схемотехника транзисторных преобразователей частоты.

5. Простейшие схемы LC-автогенераторов.

6. Варианты распределения селективных цепей по УПЧ.

7. Особенности и недостатки распределенной селекции на одинаково настроенных контурах.

8. Основные разновидности аппроксимаций АЧХ фильтров.

9. Активные фильтры сосредоточенной селекции.

3.5 Контрольная работа (тесты)

Вопрос 1. Антенны с каким характером импеданса относят к ненастроенным?

- 1) с вещественным импедансом;
- 2) с индуктивным или емкостным характером импеданса;
- 3) только с индуктивным характером импеданса;
- 4) только с емкостным характером импеданса.

Вопрос 2. Как можно согласовать короткий электрический вибратор со входом малошумящего усилителя?

- 1) добавить проходную емкость;
- 2) добавить емкость параллельно входу малошумящего усилителя;
- 3) включить трансформатор между антенной и малошумящим усилителем;
- 4) добавить проходную индуктивность;
- 5) никак; в любом случае такая антенна будет неэффективна.

Вопрос 3. Отметьте все задачи, которые должна решать входная цепь приемника.

- 1) поддержка перестройки приемника по диапазону;
- 2) согласование импеданса антенны и последующего усилителя;
- 3) обеспечение избирательности по зеркальному каналу;
- 4) обеспечение избирательности по соседнему каналу.

Вопрос 4. Отметьте элементы, которые не вносят никакого вклада в общие шумы схемы.

- 1) резисторы;
- 2) индуктивности;
- 3) транзисторы;
- 4) диоды;
- 5) конденсаторы.

Вопрос 5. Как работает преобразователь частоты (смеситель)?

- 1) выделяет огибающую входного сигнала и этим сигналом модулирует новую частоту;
- 2) перемножает входной радиочастотный сигнал и сигнал гетеродина;
- 3) суммирует входной радиочастотный сигнал и сигнал гетеродина.

Вопрос 6. Откуда берется понятие «точка пересечения»?

- 1) это точка, в которой зеркальный канал по частоте пересекается с основным;
- 2) при уменьшении амплитуды входного сигнала он однажды сравнивается с уровнем его нелинейных искажений;
- 3) высшая гармоника возникает от возведения в степень входного сигнала и «догоняет» его по уровню при увеличении амплитуды;
- 4) это точка, в которой пересекаются реальная амплитудная характеристика устройства и ее линейная аппроксимация.

Вариант 7. Отметьте все элементы, на которых может быть функционально выполнен преобразователь частоты (смеситель).

- 1) нелинейные емкости;
- 2) транзисторы;
- 3) линейные конденсаторы;
- 4) диоды;
- 5) резисторы.

Вариант 8. Что значит «двойной балансный» преобразователь частоты с эксплуатационной точки зрения?

- 1) вход преобразователя частоты парафазный (балансный);
- 2) преобразователь частоты не пропускает на выход частоту гетеродина;
- 3) преобразователь частоты не пропускает на выход частоту входного сигнала;
- 4) преобразователь частоты не пропускает на выход частоту входного сигнала и гетеродина;
- 5) вход и выход преобразователя частоты парафазные (балансные).

Вопрос 9. Как включается кварцевый резонатор в обратную связь автогенератора?

- 1) только параллельно (между «горячим» проводом и землей);
- 2) параллельно при использовании механического резонанса и на проход при использовании электромеханического резонанса;
- 3) только на проход;
- 4) на проход при использовании механического резонанса и параллельно при использовании электромеханического резонанса.

Вопрос 10. Как устроен синтезатор частоты на основе ФАПЧ?

- 1) это петля из частотного детектора, ФВЧ, генератора управляемого напряжением;
- 2) это петля из частотного детектора, ФНЧ, генератора управляемого напряжением;
- 3) это последовательно включенные фазовый детектор, ФНЧ, генератор управляемый напряжением;
- 4) это петля из фазового детектора, ФНЧ, генератора управляемого напряжением;
- 5) это петля из фазового детектора, ФВЧ, генератора управляемого напряжением.

Вопрос 11. Основу синтезатора частоты с прямым цифровым синтезом (DDS) составляет...

- 1) ЦАП;
- 2) умножитель частоты;
- 3) АЦП;
- 4) преобразователь частоты.

Вопрос 12. Какой один параметр объединяет требования к фильтрам основной селекции по полосе пропускания и избирательности?

- 1) порядок фильтра;
- 2) коэффициент прямоугольности;
- 3) амплитудно-частотная характеристика;
- 4) коэффициент пропускания;
- 5) ослабление при заданной расстройке.

Вопрос 13. Как устроены фильтры на объемных акустических волнах?

- 1) лестнично соединенные несколько кварцевых пластинок, каждая из которых работает как последовательный или параллельный резонансный контур;
- 2) кусок звукопроводного вещества на гранях которого установлены своеобразные «динамик» и «микрофон»;
- 3) кусок сегнетоэлектрического вещества, каждое из трех измерений которого сопоставимо с длиной акустической волны в нем;
- 4) на сегнетоэлектрической пластине нанесена решетка проводников, которая поддерживает распространяющиеся в пластине волны.

3.6 Руководства к лабораторным работам

3.6.1 Изучение маломощного усилителя

Целью лабораторной работы является изучение схемотехники и характеристик маломощных усилителей, исключительно за счет которых обеспечивается реальная чувствительность радиоприемников.

Для выполнения лабораторной работы требуется установленное на компьютере программное обеспечение AWR Design Environment версии не ниже 13. Нужная версия доступна на сайте <https://awrcorp.com>. После установки действует 30-дневная бесплатная лицензия.

Данное руководство предполагает наличие базовых знаний интерфейса AWR Design Environment и не заменяет справочные и обучающие материалы по основам моделирования в этой САПР. Сведения по основам работы в САПР AWR Design Environment можно почерпнуть из руководств для начинающих, расположенных по адресам https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/AO_Getting_Started_ru.pdf и https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/MWO_Getting_Started_ru.pdf.

Последовательность выполнения работы.

1. Запустите программное обеспечение AWR Design Environment. Создайте поле для принципиальной схемы (Project/Add Schematic/New Schematic). Чтобы не путаться с размерностями, лучше установить все единицы измерения в системе СИ (Options/Project Options/Global Units). В дальнейшем можно использовать запись номиналов с использованием производных единиц (10p, 0.1u, 1k и пр.) Исключение можно сделать для частоты (оставить в МГц).

2. Соберите схему усилителя, как приведено рисунке 3.4 (номиналы некоторых элементов для вашего варианта могут отличаться). Модель транзистора VT1 можно найти в онлайн библиотеке (вкладка Elements, Circuits Elements/Libraries/* AWR web site/Parts By Vendor/Philips/Nonlinear/RFwideband/BFR540). Транзистор размещается в виде подсхемы, которая по умолчанию изображается в виде прямоугольника. Задайте ему привычное условное графическое изображение (правая клавиша мыши – Properties/Symbol; выберите BJT3@system.syf).

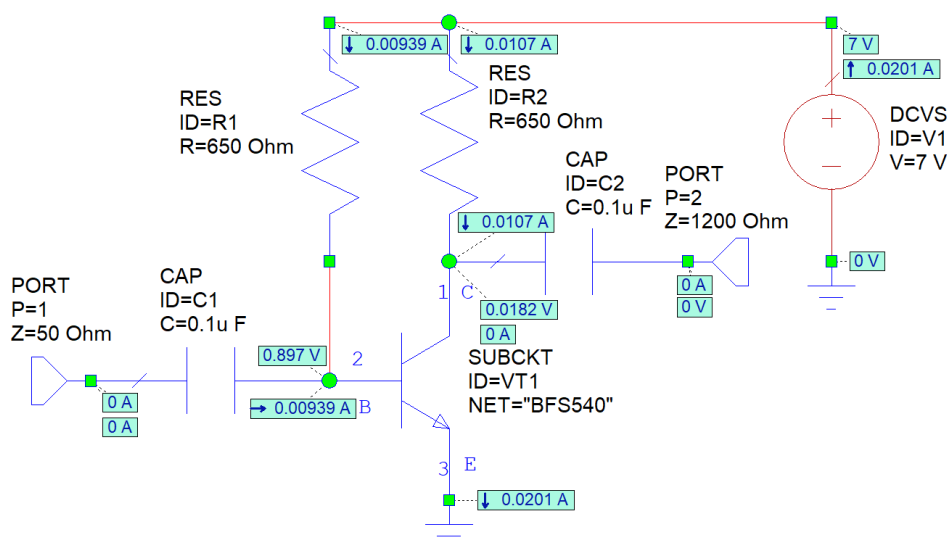


Рисунок 3.4 – Усилительный каскад на одном транзисторе

3. Включите на схеме отображение постоянных напряжений в узлах и токов в ветвях. Для этого во вкладке Project в ветке Circuit Schematics нажмите правую клавишу на имени схемы и выберите пункт Add Annotation. Добавьте аннотации двух типов: DCIA (отображе-

ние токов в схеме) и DCVA_N (отображение напряжений). Выполните симуляцию схемы (меню Simulate/Analyze). Изображения напряжений и токов должны появиться на схеме (как на рисунке 1).

4. Подберите сопротивление резистора R1 таким образом, чтобы получить напряжение на коллекторе транзистора, указанное в вашем варианте работы. Скриншот схемы для этого случая приведите в отчете.

5. Рассчитайте коэффициент усиления каскада (как функцию частоты). Создайте прямоугольный график (меню Project/Add Graph). На нем разместите новую кривую измерения (Project/Add Measurement). В появившемся окне в области Measurement Type выберите ветку Linear/Gain, а в области Measurement – измерение VTG (Voltage Gain from Input Terminal). Укажите, что усиление нужно построить от первого порта до второго (окна From port, To port). В качестве источника данных (Data Source Name) укажите имя схемы усилителя. Проверьте, что в области Complex Modifier у вас выбрано отображение модуля сопротивления (Mag.). Установите диапазон частот, в котором будет выполняться анализ (Options/Project Options/Frequencies): 1...100 МГц с шагом 1 МГц (для применения изменений обязательно нужно нажать кнопку Apply). Выполните расчет кривой (Simulate/Analyze). Скриншот графика приведите в отчете.

6. Такой способ задания рабочей точки транзистора, который используется сейчас, практически никогда не реализуют на практике. Причина состоит в большой чувствительности такой схемы к отклонению параметров транзистора. Фактически, для каждого экземпляра транзистора приходится R1 подбирать индивидуально. Оцените нестабильность данной схемы. На транзисторе VT1 нажмите правую клавишу мыши и выберите пункт Edit Subcircuits. Модель представлена в формате списка цепей (netlist). Найдите параметр транзистора BF (коэффициент передачи тока в схеме с ОЭ). Для транзистора BFR540 этот параметр может находиться в интервале 100...250. Изменяйте значение BF в модели в этих пределах и посмотрите, как меняется коллекторное напряжение. Если вы все делаете правильно, рабочая точка по напряжению на коллекторе будет меняться на несколько Вольт, что в данном случае абсолютно неприемлемо. Численные результаты приведите в отчете. Верните назад исходное значение параметра BF (184).

7. Вторым недостатком данной схемы состоит в плохом согласовании с сопротивлением подводящей 50-омной линии (антенной). Оцените это качество согласования. Для этого измерьте входное сопротивление усилителя. Создайте прямоугольный график (меню Project/Add Graph). На нем разместите новую кривую измерения (Project/Add Measurement). В появившемся окне в области Measurement Type выберите ветку Linear, а в области Measurement – измерение ZIN. Проверьте, что в области Complex Modifier у вас выбрано отображение модуля сопротивления (Mag.). Укажите для измерения первый порт (окно Port index). В качестве источника данных (Data Source Name) укажите имя схемы усилителя. Выполните расчет кривой (Simulate/Analyze). Входное сопротивление данной схемы в рассматриваемом диапазоне частот меняется весьма сильно – от нескольких сот до нескольких десятков Ом. Скриншот графика приведите в отчете.

8. Сделать рабочую точку более стабильной и, одновременно, улучшить качество согласования позволяет параллельная отрицательная обратная связь. Для формирования обратной связи присоедините резистор R1 между базой и коллектором VT1. После этого нужно будет заново подобрать сопротивление этого резистора для обеспечения прежнего напряжения на коллекторе. Как изменилось сопротивление R1? Почему? Скриншот схемы усилителя приведите в отчете.

9. Проверьте стабильность рабочей точки с обратной связью. Измените параметр BF транзистора в пределах 100...250 и зафиксируйте, насколько меняется напряжение на коллекторе. Результат приведите в отчете.

10. Оцените качество согласования с подводящей линией для схемы с обратной связью. Пронаблюдайте и приведите в отчет график входного сопротивления усилителя для это-

го случая. Если вы все делаете правильно, входной импеданс в наблюдаемой области частот будет меняться в пределах примерно 20...40 Ом, т.е. значительно меньше, чем без обратной связи. Скриншот входного сопротивления усилителя с комментариями приведите в отчете.

11. Теперь входной импеданс гораздо ближе к сопротивлению подводящей линии (50 Ом), но обратная связь уменьшила его слишком сильно. Чтобы обеспечить еще лучшее качество согласования, нужно несколько ослабить обратную связь. Для этого увеличьте R1 до получения входного сопротивления усилителя на нижней частоте 50 Ом.

12. После увеличения R1 рабочая точка транзистора несколько изменится. Присоедините между базой транзистора и «плюсом» источника питания DCVS дополнительный резистор. Регулируя его сопротивление, добейтесь возвращения коллекторного напряжения транзистора к предписанному в вашем варианте значению. Приведите скриншоты получившейся схемы и графика входного сопротивления в отчете.

13. Теперь согласование с подводящей линией обеспечено только на самых нижних частотах. На верхних частотах входное сопротивление усилителя уменьшается. Чтобы дополнительно увеличить его на верхних частотах, уменьшите глубину обратной связи в области верхних частот. Для этого резистор R1 замените двумя последовательно соединенными резисторами вдвое меньшего сопротивления. Между точкой соединения этих резисторов и общим проводом присоедините конденсатор емкостью порядка единиц пФ. Регулируя емкость этого конденсатора, добейтесь, чтобы входное сопротивление усилителя было близким к 50 Ом в максимально широкой области частот. Скриншоты получившейся схемы, графиков входного импеданса и коэффициента усиления приведите в отчете.

14. Практически анализ малошумящих усилителей по переменному току (согласование импедансов, усиление, расчет шумов) выполняют, как правило, на линеаризованных моделях. Они непригодны для выбора рабочей точки транзистора, но обеспечивают гораздо меньшую погрешность моделирования в окрестности выбранной рабочей точки. Перейдите к линеаризованной модели транзистора. Удалите из схемы нелинейную модель VT1. Из прилагаемого к настоящему руководству файла BFR540.s2p загрузите линеаризованную модель транзистора BFR540. Для этого в меню Project/Add Data File выберите пункт Import Data File. Установите тип файла Touchstone Files и выберите указанный файл. Теперь во вкладке Elements в ветке Circuits Elements/Subcircuits появится элемент BFR540; разместите его на схеме. Обратите внимание, что элемент имеет всего два вывода. Дело в том, что данная модель представляет транзистор S-параметрами в заранее выбранной схеме включения (ОЭ в данном случае). Поэтому эмиттер безусловным образом считается заземленным, пользователь не может подключать его сам. Как и ранее, примените стандартное условное графическое обозначение транзистора к данному элементу (на этот раз BJT2@system.sif). Скриншоты схемы, графиков входного сопротивления и усиления приведите в отчете. Проанализируйте разницу характеристик усилителя, рассчитанных на нелинейной SPICE-модели и на линеаризованной модели в виде S-параметров.

15. Рассчитайте коэффициент шума усилителя (как функцию частоты). Создайте прямоугольный график (меню Project/Add Graph). На нем разместите новую кривую измерения (Project/Add Measurement). В появившемся окне в области Measurement Type выберите ветку Linear/Noise, а в области Measurement – измерение NF (Noise Factor). Укажите, что коэффициент шума нужно построить от первого порта до второго (окна From port, To port). Как правило коэффициент шума выражают в логарифмической шкале, поэтому установите флажок в окошке dB. В качестве источника данных (Data Source Name) укажите имя схемы усилителя.

16. На отдельном графике постройте зависимость шумовой температуры усилителя (аналогично предыдущему пункту в ветке Linear/Noise выбрать измерение TE (Equivalent Input Noise Temperature)). Флажок dB, естественно, устанавливать не надо.

17. Проанализируйте шумовые характеристики усилителя. Какое место он занимает в ряду существующих малошумящих усилителей?

Отчет должен содержать следующее: титульный лист, цель работы, требуемые скриншоты с необходимыми пояснениями, анализ результатов и выводы.

3.6.2 Изучение цифрового частотного детектора

Целью лабораторной работы является изучение функционирования цифрового частотного детектора на примере демодуляции сигнала радиовещательной станции в УКВ или FM-диапазоне.

Для выполнения лабораторной работы необходим трансивер National Instruments USRP серии 29XX. Трансивер должен быть подключен к компьютеру со звуковой подсистемой.

Необходимые теоретические сведения. Частота есть производная фазы сигнала по времени:

$$\omega = d\{\arg[x(t)]\}/dt. \quad (3.1)$$

Непосредственно использовать эту формулу не следует, поскольку функция $\arg(\cdot)$ имеет разрывный характер и ее корректное численное дифференцирование не везде возможно. Однако если выполнить дифференцирование в (3.1) в общем виде, то получим:

$$\omega = \{\operatorname{Re}[x(t)]\operatorname{Im}'[x(t)] - \operatorname{Im}[x(t)]\operatorname{Re}'[x(t)]\}/\{\operatorname{Re}^2[x(t)] + \operatorname{Im}^2[x(t)]\}.$$

Применительно к дискретным сигналам данная формула приобретает вид:

$$\omega_i = \{\operatorname{Re}[x_i] \operatorname{Im}[x_i - 1] - \operatorname{Im}[x_i] \operatorname{Re}[x_i - 1]\}/\{\operatorname{Re}^2[x_i] + \operatorname{Im}^2[x_i]\}. \quad (3.2)$$

Последовательность выполнения работы

1. Подключите ко входу приемника USRP антенну. Настройте USRP трансивер таким же образом, как в лабораторной работе по изучению USRP. Запустите LabVIEW-файл, созданный в лабораторной работе по изучению USRP для управления приемником.

2. Выполните обзор FM-диапазона 100...108 МГц. Для этого установите значение частоты гетеродина приемника (carrier frequency) 104 МГц и частоту дискретизации АЦП (IQ sampling rate) 8 МГц. По спектру сигнала определите частоту наиболее мощной радиостанции. Установите частоту гетеродина приемника равной частоте выбранной радиостанции, а частоту дискретизации АЦП установите 196 кГц. Зарегистрируйте спектр сигнала радиостанции и график разместите в отчете.

3. Отфильтруйте принимаемый сигнал. Расщепите комплексный выходной сигнал блока «niUSRP Fetch RX Data» на вещественную и мнимую составляющую используя меню Programming/Numeric/Complex. Каждую из составляющих пропустите через элемент «Filter» из меню Signal Processing/Waveform Conditioning. Двойным щелчком левой клавиши мыши войдите в меню настройки элемента «Filter» и для каждого из фильтров установите частоту среза 65 кГц. Для одной из отфильтрованных составляющих постройте график спектра при помощи элемента FFT Power Spectrum. График приведите в отчете. Выбирайте несколько видов фильтров разного порядка. Оцените их влияние на спектр сигнала радиостанции. Графики приведите в отчете.

4. Выполните частотное детектирование. Извлеките из выходного сигнала каждого фильтра числовые вектора данных при помощи элемента Programming/Waveform/Get Waveform Components. Извлеките также параметры dt и t_0 , которые будут использованы в дальнейшем. Выполните преобразования, предписанные формулой (3.2), понимая под $\operatorname{Re}[x]$ и $\operatorname{Im}[x]$ выходные сигналы фильтров. Для этого используйте цикл типа For, а для доступа к предыдущим элементам массива – сдвиговые регистры. Упакуйте полученный вектор в сиг-

нал типа Waveform при помощи элемента Programming/Waveform/Build Waveform, добавив к вектору ранее полученные параметры dt и t_0 . Постройте график протектированного сигнала и приведите его в отчете.

5. Выведите протектированный сигнал на звуковую карту. Последовательно соедините элементы Sound Output Configure, Sound Output Write и Sound Output Start из меню Graphics & Sound/Sound/Output. Для элемента Sound Output Configure установите частоту дискретизации 196 кГц, два канала и разрядность 16 бит. На вход элемента Sound Output Write подайте протектированный сигнал. Запустите программу.

Отчет должен содержать следующее: титульный лист, цель работы, предписанные графики с пояснениями, анализ результатов и выводы.

3.6.3 Изучение преобразователя частоты (для дистанционного обучения)

Целью лабораторной работы является изучение различных вариантов диодных преобразователей частоты.

Для выполнения лабораторной работы требуется установленное на компьютере программное обеспечение AWR Design Environment версии не ниже 13. Нужная версия доступна на сайте <https://awrcorp.com>. После установки действует 30-дневная бесплатная лицензия.

Данное руководство предполагает наличие базовых знаний интерфейса AWR Design Environment и не заменяет справочные и обучающие материалы по основам моделирования в этой САПР. Сведения по основам работы в САПР AWR Design Environment можно почерпнуть из руководств для начинающих, расположенных по адресам https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/AO_Getting_Started_ru.pdf и https://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=docs/MWO_Getting_Started_ru.pdf.

Последовательность выполнения работы.

1. Запустите программное обеспечение AWR Design Environment. Чтобы не путаться с размерностями, лучше установить все единицы измерения в системе СИ (Options/Project Options/Global Units). Исключение можно сделать для частоты (оставить в МГц).

2. Откройте прилагаемый файл «Модели диодов.emp». Там создано поле принципиальной схемы с именем Schematics, на котором размещены модели диодов. Выберите диод, соответствующий вашему варианту. Остальные можете удалить.

3. С использованием модели диода из вашего варианта соберите схему простейшего преобразователя частоты на одном диоде (рисунок 3.5). Скриншот приведите в отчете. На этой схеме генератор G1 (100 МГц) имитирует принимаемый радиосигнал, который приходит с маломощного усилителя. Генератор G2 – это гетеродин приемника с верхней настройкой (110 МГц). Амплитуды сигналов гетеродина и полезного сигнала устанавливаются в соответствии с вашим вариантом.

4. Установите нужные настройки симулятора. Далее все моделирование будет проходить для частот 100 и 110 МГц. Их наибольший общий делитель: 10 МГц. Такую частоту и нужно установить в качестве базовой частоты симуляции (Options/Project Options/Frequencies; установить Single Point, нажать Apply). В меню Options/Circuit Options/APLAC Sim в ветке Transient Options снимите флажок Use HB Settings и установите параметры Stop time и Step time соответственно 200 нс и 0.5 нс. При этом на графиках будет отображаться два периода разностной частоты указанных сигналов; это наиболее наглядный режим просмотра.

5. Посмотрите осциллограммы сигналов до диода и после. Для этого создайте прямоугольный график (меню Project/Add Graph). На нем разместите новую кривую измерения (Project/Add Measurement). В появившемся окне в области Measurement Type выберите ветку Nonlinear/Voltage, а в области Measurement – измерение Vtime. В области Measurement Component нажмите кнопку с троеточием. В открывшемся окне слева снизу выберите анод диода (SUBCKT.VD1@1). Выберите симулятор APLAC Trans. На этом же графике разместите еще

одно такое же измерение для катода диода. Выполните симуляцию (Simulate/Analyze). Скриншот графика приведите в отчете. Объясните кривые, которые вы видите. Судя по их внешнему виду, есть ли промежуточная частота на входе диода? на выходе диода?

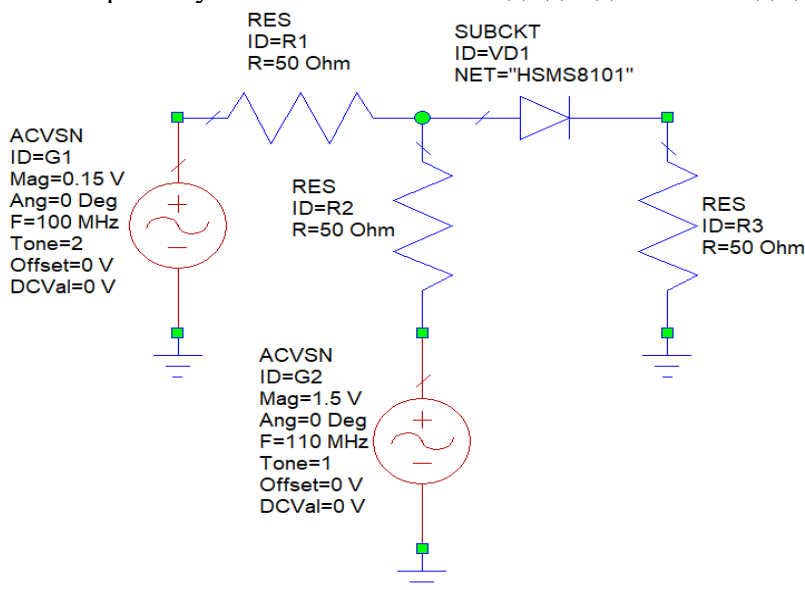


Рисунок 3.5 – Простейший диодный преобразователь частоты

6. Постройте спектр сигнала на выходе преобразователя частоты (катод диода). Выполните действия, аналогичные п. 5, только выберите измерение V_{harm} (спектр рассчитанного во временной области сигнала). Поскольку этот тип измерений выдает комплексные данные, выберите модуль для отображения на графике. Получившийся скриншот приведите в отчете. Обозначьте на нем полезный сигнал – промежуточную частоту. Как понимать (как образуются) остальные видимые спектральные компоненты на этом графике?

7. По полученному графику спектра определите коэффициент преобразования данного преобразователя частоты как отношение модуля спектральной составляющей на промежуточной частоте к амплитуде полезного сигнала на входе (0.15 В).

8. Основной недостаток данной схемы – проникновение сигналов гетеродина и промежуточной частоты на вход преобразователя частоты. Сигнал гетеродина на входе такого преобразователя частоты намного превышает слабый полезный сигнал, может перегружать маломощный усилитель и приводить к паразитному излучению гетеродинного сигнала антенной приемника. Чтобы продемонстрировать этот недостаток, постройте спектр тока через внутреннее сопротивление источника полезного радиосигнала (R1). Для этого действуйте аналогично п. 6, но качестве типа измерения (Measurement Type) укажите ветку Nonlinear/Current, а собственно измерение укажите I_{harm} . Скриншот графика приведите в отчете. Какие спектральные составляющие на нем являются полезными, а какие – вредными?

9. Основной недостаток простейшего преобразователя частоты – проникновение на вход гетеродинного сигнала – устраняется в схеме балансного диодного преобразователя частоты (рисунок 3.6). Соберите эту схему на диоде, указанном в вашем варианте. Скриншот схемы приведите в отчете. Постройте и приведите в отчете осциллограмму (аналогично п. 5) сигнала на выходе этого преобразователя частоты (верхний вывод резистора R3). Сравните эту осциллограмму с осциллограммой сигнала на выходе преобразователя частоты на одном диоде. Какая осциллограмма ближе к гармоническому полезному сигналу промежуточной частоты?

10. Аналогично п. 6 постройте спектр сигнала на выходе балансного преобразователя частоты. Обозначьте на нем промежуточную частоту. Скриншот приведите в отчете. Сравните данный спектр со спектром на выходе преобразователя частоты по рисунку 3.5. Где уровень полезного сигнала больше? Где уровень вредных спектральных составляющих меньше?

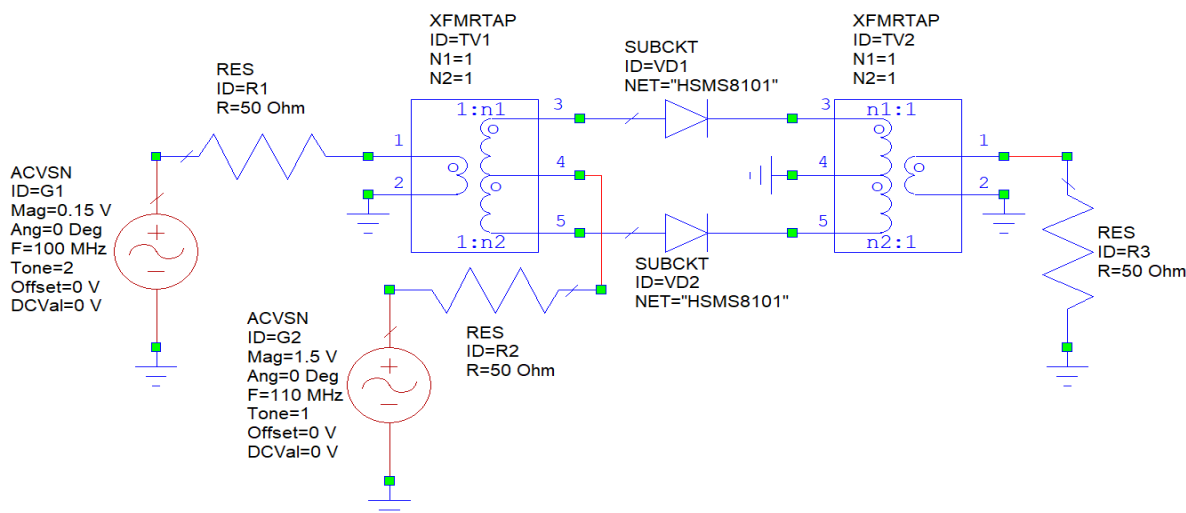


Рисунок 3.6 – Балансный диодный преобразователь частоты

11. Аналогично п. 7 рассчитайте коэффициент преобразования данной схемы. Сопоставьте его с аналогичным параметром для однодиодной схемы.

12. Аналогично п. 8 постройте для балансного преобразователя частоты спектр тока через резистор R1. В этом спектре полезной является только составляющая с частотой 100 МГц. Составляющие с частотой гетеродина и с промежуточной частотой являются вредными. Сопоставьте амплитуду вредных спектральных составляющих с таковыми для однодиодной схемы.

13. Недостатком балансного преобразователя частоты является, в основном, проникновение сигнала промежуточной частоты на его вход (и далее ко входу приемника). Этот недостаток устраняется в схеме двойного балансного преобразователя частоты. Чтобы получить такой преобразователь частоты, добавьте в схему на рисунке 3 еще два диода «по диагонали». Один диод должен соединять катод VD2 с анодом VD1, второй – анод VD2 с катодом VD1. Направление включения дополнительных диодов должно быть такое, чтобы все четыре диода образовали кольцо, в котором катод одного диода соединяется с анодом другого.

14. Для двойного балансного смесителя постройте осциллограмму выходного сигнала. Сравните ее с таковой простого балансного преобразователя частоты (по рисунку 2).

15. Постройте график спектра напряжения на выходе двойного балансного преобразователя частоты. Как отличаются полезные и вредные спектральные составляющие на выходах простого (по рисунку 2) и двойного балансного преобразователей частоты?

16. Постройте график спектра входного тока двойного балансного преобразователя частоты. Как соотносится величина спектральных составляющих с промежуточной частотой и с частотой гетеродина с таковыми для других рассмотренных вариантов преобразователя частоты?

17. Рассчитайте коэффициент преобразования для двойного балансного преобразователя частоты. Сравните его с таковыми для других рассмотренных вариантов схемы.

Отчет должен содержать следующее: титульный лист, цель работы, требуемые скриншоты с необходимыми пояснениями, анализ результатов и выводы.

3.7 Указания к самостоятельной работе

На самостоятельную работу выносятся подготовка к текстовой контрольной работе при очном изучении курса или подготовка к тесту и выполнение теста при дистантном обучении.

Кроме того, на самостоятельное изучение может быть вынесено изучение руководства к лабораторной работе [7] для ее более быстрого и результативного выполнения на занятии.

4 АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛИРОВКИ В УСТРОЙСТВАХ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

4.1 Краткие сведения из лекционного курса

Приемниках используются автоматические регулировки усиления и частоты.

Автоматическая регулировка усиления (АРУ) стабилизирует амплитуду выходного сигнала линейного тракта приемника и исключает перегрузку его активных элементов. Тем самым расширяется диапазон уровней входного сигнала (динамический диапазон), при котором обеспечивается нормальная работа приемника.

Перегрузка в первую очередь возникает в выходных каскадах приемника (где уровень сигнала максимальный), поэтому правильной организацией работы АРУ является эстафетный алгоритм. При этом для малого входного сигнала усиление всех каскадов максимально. При увеличении сигнала вначале снижается усиление в самом последнем активном каскаде, затем в предпоследнем и т.д.

Регулировка усиления каскада или узла осуществляется за счет охвата его отрицательной обратной связью по огибающей сигнала (АРУ с обратным регулированием), для чего в цепь обратной связи включаются детектор огибающей и ФНЧ. Как правило, также в цепь обратной связи включают пороговое устройство, которое замыкает цепь обратной связи (авторегулирования) только если уровень сигнала превышает заданное пороговое значения. Такой прием называют задержкой срабатывания АРУ (АРУ с задержкой). Он служит для поддержания максимального усиления и чувствительности для малых сигналов, которые не вызывают перегрузки приемника и без АРУ.

Альтернативно АРУ могут быть и с прямым регулированием, когда на детектор огибающей подается входной, а не выходной сигнал регулируемого узла. Возможна также комбинированная схема, при которой детектор огибающей и ФНЧ входят в цепь обратного регулирования предыдущего каскада и в цепь прямого регулирования последующего.

Исполнительным узлом системы АРУ является регулятор усиления, который реализуется либо модификацией схемы регулируемого узла (усилителя или смесителя), либо как отдельный узел. По принципу действия и схемотехнике он не отличается от смесителей (перемножителей). В любом случае он выполняется на нелинейном элементе, крутизна амплитудной характеристики которого меняется под действием внешнего сигнала.

Системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) используются либо для подстройки частоты гетеродина, либо для подстройки частоты и фазы генератора тактовых импульсов, определяющих моменты регистрации цифровых символов.

Системы АПЧ делятся на статические (уменьшающие, но не обнуляющие ошибку подстройки параметра) и астатические (статическая ошибка подстройки параметра строго равна нулю). Если параметром, по которому оценивается и минимизируется ошибка, является частота, то такой вариант называют системой частотной автоподстройки частоты (ЧАПЧ или просто АПЧ). Если контролируется и подстраивается фаза, то говорят о фазовой автоподстройке частоты (ФАПЧ). ФАПЧ всегда является статической по частоте (постоянная разность фаз может быть только у одинаковых частот).

АПЧ может подстраивать частоту генератора либо под среднее значение входной частоты / фазы (системы стабилизации частоты), либо под мгновенное значение (следающие системы). Следающие системы используются, в основном, в приемниках с аналоговой обработкой сигналов (например, в качестве частотных детекторов в приемниках прямого преобразования). В приемниках с цифровой обработкой сигналов обычно используют системы стабилизации частоты, а девиацию входной частоты относительно среднего значения оценивают цифровыми методами.

Все системы АПЧ содержат генератор управляемый напряжением (ГУН), фазовый или частотный дискриминатор (сравнивает частоту ГУН с частотой, под которую его нужно

подстроить (опорный сигнал)). Между дискриминатором и ГУН включают ФНЧ. ФНЧ удаляет сами сравниваемые частоты и быстрые отклонения частоты и фазы опорного сигнала (например, в системах стабилизации частоты).

Усиление на нулевой частоте в петле авторегулирования определяет статическую ошибку регулирования. Например, для создания астатических по фазе ФАПЧ в петлю авторегулирования включают интегратор (усиление которого на нулевой частоте бесконечно).

4.2 Контрольная работа (письменный вариант)

Вариант 1

1. Какие и для чего применяются системы автоматики в УПОС?
2. Основные параметры АРУ.
3. Цифровая АРУ.
4. Следящая ФАПЧ.

Вариант 2

1. Что такое динамический диапазон приемника?
2. Структурная схема АРУ.
3. Схемы регуляторов систем АРУ.
4. Статические АПЧ.

Вариант 3

1. Закономерности накопления нелинейных искажений и шумов в УПОС.
2. Простая и задержанная АРУ и их амплитудные характеристики.
3. АРУ с прямым, обратным и комбинированным регулированием.
4. Разновидности систем АПЧ.

Вариант 4

1. Для чего предназначена АРУ в УПОС?
2. Что такое эстафетная АРУ? Что дает такое построение системы АРУ?
3. Регулировочные характеристики простой, задержанной и бесшумной АРУ.
4. Астатические по фазе системы ФАПЧ.

4.3 Контрольная работа (тесты)

Вопрос 1. Автоматическая регулировка усиления в приемниках служит для...

- 1) исключения перегрузки приемника при большом уровне несущей частоты радиосигнала;
- 2) уменьшения усиления при увеличении глубины (индекса) модуляции в передатчике;
- 3) увеличения усиления при недостаточной глубине модуляции в передатчике;
- 4) дополнительного усиления сигнала при недостаточном уровне несущей частоты радиосигнала.

Вопрос 2. Какие каскады приемника в первую очередь нужно охватывать петлями автоматической регулировки усиления?

- 1) первый каскад;
- 2) сигнал проходит все каскады и может их перегрузить. Поэтому все каскады нужно в одинаковой степени охватывать системой АРУ;
- 3) последний каскад.

Вопрос 3. Что такое эстафетная АРУ?

- 1) система, в которой до определенного уровня входного сигнала усиление не меняется вообще, а при превышении этого уровня начинает уменьшаться;
- 2) система АРУ, в которой вначале уменьшается усиление в последнем каскаде, затем в предпоследнем и т.д.;
- 3) система АРУ, в которой вначале уменьшается усиление первого каскада, затем второго и т.д.;
- 4) система, в которой до определенного уровня входного сигнала усиление не меняется вообще, а если сигнал меньше этого уровня, то усиление увеличивается.

Вопрос 4. Регулирующее напряжение для АРУ выбирается в соответствии...

- 1) с пиковыми значениями огибающей, зарегистрированными за определенный интервал времени;
- 2) с фазой радиосигнала;
- 3) с огибающей радиосигнала;
- 4) с мгновенным напряжением радиосигнала.

Вопрос 5. Что такое задержанная АРУ?

- 1) АРУ, в которой увеличение усиления начинается только если амплитуда сигнала меньше порогового уровня;
- 2) АРУ, в которой в тракт регулирования установлена линия задержки.
- 3) АРУ, в которой уменьшение усиления начинается только при превышении сигналом некоторого порога.
- 4) АРУ, которая срабатывает с запаздыванием при изменении амплитуды входного сигнала.

Вопрос 6. Что такое регулировочная характеристика?

- 1) зависимость регулирующего напряжения от уровня выходного сигнала регулируемой цепи;
- 2) зависимость уровня выходного сигнала регулируемой цепи от регулирующего напряжения;
- 3) зависимость коэффициента усиления регулируемой цепи от регулирующего напряжения;
- 4) зависимость регулирующего напряжения от уровня входного сигнала регулируемой цепи.

Вопрос 7. Что такое АРУ с обратным регулированием?

- 1) АРУ, в которой протектированный сигнал перед подачей на управляющие цепи инвертируется;
- 2) АРУ, в которой сигнал для выработки управляющего напряжения берется с выхода регулируемого каскада;
- 3) АРУ, которая уменьшает усиление при увеличении сигнала.

Вопрос 8. Что такое АРУ с прямым регулированием?

- 1) АРУ, в которой регулирующее напряжение зависит от входного сигнала регулируемой цепи;
- 2) АРУ, в которой уменьшение усиления при увеличении амплитуды входного сигнала происходит параметрически (например, встречно-параллельно включенные диоды);
- 3) АРУ, в которой усиление тем больше, чем больше амплитуда входного сигнала (экспандер).

Вопрос 9. Какую функциональную операцию выполняет регулятор системы АРУ?

- 1) перемножает регулируемый и регулирующий сигнал;

- 2) суммирует регулирующий сигнал и регулируемый;
- 3) накладывает регулирующий сигнал на регулируемый.

Вопрос 10. Верно ли, что регулятор системы АРУ невозможно выполнить без нелинейных элементов?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 11. К каким последствиям может приводить неточная настройка приемника на частоту несущей принимаемого сигнала в разных видах приемников?

- 1) к полной неработоспособности приемника;
- 2) к искажениям спектра демодулированного сигнала (линейные искажения);
- 3) к любому из перечисленных эффектов;
- 4) к нелинейным искажениям.

Вопрос 12. Что такое астатическая система автоподстройки частоты?

- 1) система, подстраивающая частоту гетеродина не только в статике, но и при изменении параметров входного сигнала;
- 2) система, способная подстраивать частоту гетеродина без опоры на сигнал с референсной частотой;
- 3) система автоматического регулирования, не допускающая никакой ошибки по регулируемому параметру.

Вопрос 13. Что такое статическая система автоподстройки частоты?

- 1) система автоподстройки, стабилизирующая частоту гетеродина на заданном значении.
- 2) система, допускающая в среднем ненулевую погрешность регулирования по регулируемому параметру.
- 3) система автоподстройки частоты, скорость реакции которой намного меньше скорости изменения полезного сигнала.

Вопрос 14. Какую систему автоподстройки частоты можно назвать следящей?

- 1) систему, которая подстраивает частоту гетеродина, если меняется средняя частота входного сигнала;
- 2) любую;
- 3) систему, которая перестраивает частоту гетеродина всякий раз, когда меняется частота входного сигнала (даже по причине частотной модуляции полезным сигналом);
- 4) систему, задача которой подстраивать гетеродин, когда его частота меняется из-за дестабилизирующих факторов.

Вопрос 15. Разместите обозначения на структурной схеме ФАПЧ. ОГ – опорный генератор, N – делитель частоты (использовать одинаковые коэффициенты деления), ФД – фазовый детектор, ГУН – генератор, управляемый напряжением.

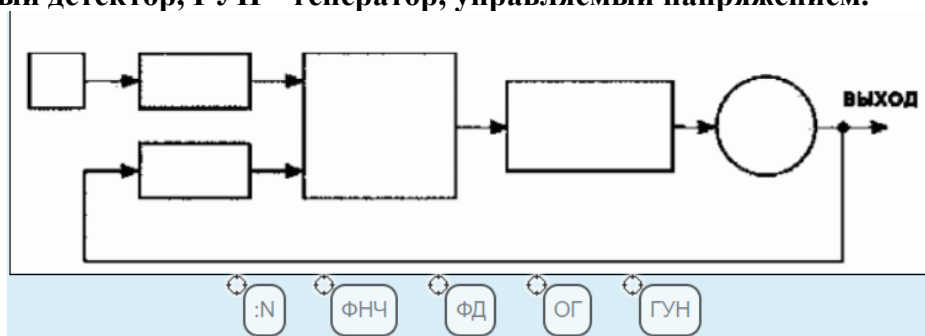


Рисунок 4.1 – Структурная схема ФАПЧ

4.4 Указания к самостоятельной работе

На самостоятельную работу выносятся подготовка к текстовой контрольной работе при очном изучении курса или подготовка к тесту и выполнение теста при дистантном обучении.

5 ОСОБЕННОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

5.1 Краткие сведения из лекционного курса

При приеме цифровых сигналов особым образом сказываются линейные, нелинейные искажения сигналов, а также шумы.

Линейные искажения сигналов в тракте передачи и приема приводят к возникновению межсимвольной интерференции – наложению последствия от предыдущего цифрового символа на последующий символ. Неэффективно выбирать интервал следования символов больше длительности последствия. Большую скорость передачи можно получить, если создать импульсную характеристику (последствие) с осцилляциями и периодически расположенными нулями на оси времени. Такие импульсы называются импульсами Найквиста. Располагая последующие цифровые символы в нулях предыдущих, устраняют межсимвольную интерференцию.

Импульсы Найквиста имеют разный уровень осцилляций. Уровень осцилляций не влияет на межсимвольную интерференцию при отсутствии шумов и дрожания импульсов. Но при наличии шумов и нестабильностей в канале связи величина межсимвольной интерференции зависит от уровня осцилляций. Чтобы уменьшить уровень осцилляций необходимо расширить спектр импульсов Найквиста по отношению к минимально возможному. Количество расширений спектра характеризуют коэффициентом сглаживания. Коэффициент сглаживания выбирают в пределах $0 \dots 1$. Он показывает, на какую долю от минимально возможной ширины спектра расширяется спектр сигнала в системе связи. Для сглаживания расширенного спектра применяют смещенный отрезок косинусоиды («приподнятый косинус»).

Импульс Найквиста можно понимать как импульсную характеристику цепи, если на ее вход подается дельта-функция (сигнал с канальным кодированием Return to Zero, RZ). Чаще, однако, на вход цепи, формирующей импульсы Найквиста (фильтр Найквиста), подаются импульсы с длительностью, равной интервалу следования цифровых символов (код Non Return to Zero, NRZ). По отношению к дельта-функции такие импульсы имеют завал верхних частот спектра по закону синка ($\sin(x)/x$). Для компенсации этого спада фильтр Найквиста делают со специфическим подъемом АЧХ в области умеренно высоких частот.

Нужно учитывать, также, что АЧХ фильтра Найквиста должна быть у системы связи в целом. Часть фильтрации обязательно нужно оставить в передатчике, а часть – в приемнике. В соответствии с теорией оптимального приема (фильтрации) получается, что АЧХ фильтров в передатчике и приемнике должна быть одинаковой. Отсюда следует, что каждая из них будет определяться как корень квадратный из АЧХ системы связи в целом.

Для манипуляций с небольшим числом бит на символ допустима некоторая ненулевая межсимвольная интерференция. В таких системах вместо импульсов Найквиста можно применять импульсы Гаусса, которые не имеют нулей на импульсной характеристике, но не имеют и выбросов / осцилляций, расширяющих спектр модулированного сигнала.

В системах CDMA, где применяется усреднение нескольких фрагментов сигнала, применяют также фильтры Чебышева. Они дают большую межсимвольную интерференцию, которая затем снижается при усреднении.

Отклонение АЧХ системы связи от АЧХ фильтра Найквиста приводит к возникновению межсимвольной интерференции и должно быть скорректировано. Коррекция выполняется обычно при помощи трансверсальных фильтров. Коэффициенты в трансверсальном фильтре выбираются так, чтобы на тестовой цифровой последовательности известной формы получить нулевую межсимвольную интерференцию. Система уравнений для отыскания коэффициентов фильтра, в которой известны входной сигнал и требуемый отклик фильтра, по-

лучается переопределенной. Ее решают либо отбрасывая наименее значимые уравнения, либо обеспечивая минимальную невязку (в среднеквадратическом смысле) всех уравнений.

При сильной многолучевости в канале связи в спектре принимаемого сигнала могут образовываться интерференционные нули, которые не скомпенсировать трансверсальным корректором. Для их коррекции требуется цепь, способная регенерировать отсутствующие спектральные составляющие (цепь с положительной обратной связью, корректор с обратной связью по решению).

Шумы в цифровых приемниках проявляются в виде дрожания фронтов импульсных сигналов (джиттера). Джиттер приводит к сужению глазка на глазковой диаграмме по оси времени, отклонению моментов выборки отсчетов от наилучшего положения и увеличению коэффициента ошибок.

Величину мгновенного отклонения фронта от номинального положения, построенную как функцию времени, называют трендом джиттера. Спектром джиттера считают преобразование Фурье от тренда.

Джиттер вызывается как случайными причинами (ненулевая температура), так и систематическими (наводки от источников периодических помех, межсимвольная интерференция, погрешности порогов срабатывания компараторов и мультиплексоров, паразитная модуляция в системах ФАПЧ).

Для джиттера можно построить гистограмму, позволяющую оценить вероятность тех или иных отклонений фронта сигнала от номинального положения. По гистограмме определяют причины джиттера. Случайный джиттер имеет гистограмму в виде гауссианы, периодический «двугорбую» гистограмму, межсимвольная интерференция дает гистограмму с плоской вершиной.

5.2 Иллюстрации основных вопросов на компьютерных моделях

Ключевыми аспектами цифрового приема является борьба с межсимвольной интерференцией и джиттером.

Для демонстрации возможностей подавления межсимвольной интерференции полезно построить несколько импульсов Найквиста, передающих соседние цифровые символы (рисунки 5.1 и 5.2). Сделать это можно, например, в системе AWR Design Environment, если построить осциллограмму сигнала на выходе блока BPSK_TX фиксированной цифровой последовательностью на входе.

Особо нужно обратить внимание, что следующий цифровой символ (пурпурные кривые) располагается не после полного завершения предыдущего (синие кривые), а в первом нуле предыдущего.

Следует также обратить внимание на весьма сильную зависимость уровня осцилляций символьных импульсов от коэффициента сглаживания.

Наконец, полезно указать, что плоская вершина при суммировании соседних цифровых символов образуется далеко не всегда (только при большом коэффициенте сглаживания).

5.3 Расчетные задания (задачи)

Преподаватель задает некоторую последовательность цифр (например, 011001). Для каждой цифры нужно построить график передающего ее импульса Найквиста. Коэффициент сглаживания для фильтра Найквиста задается преподавателем. Интервал следования символов студенты выбирают самостоятельно. Импульсы, передающие отдельные символы, нужно расположить так, чтобы следующий импульс располагался в нуле предыдущего. На получившейся суммарной кривой (сумма всех импульсов) нужно указать точки, где в приемнике

нужно будет брать отсчеты сигнала, чтобы влияние импульсов друг на друга было минимальным.

Строить графики студенты могут в любой удобной для них системе (MathCAD, LabVIEW, Matlab, AWR Design Environment и др.).

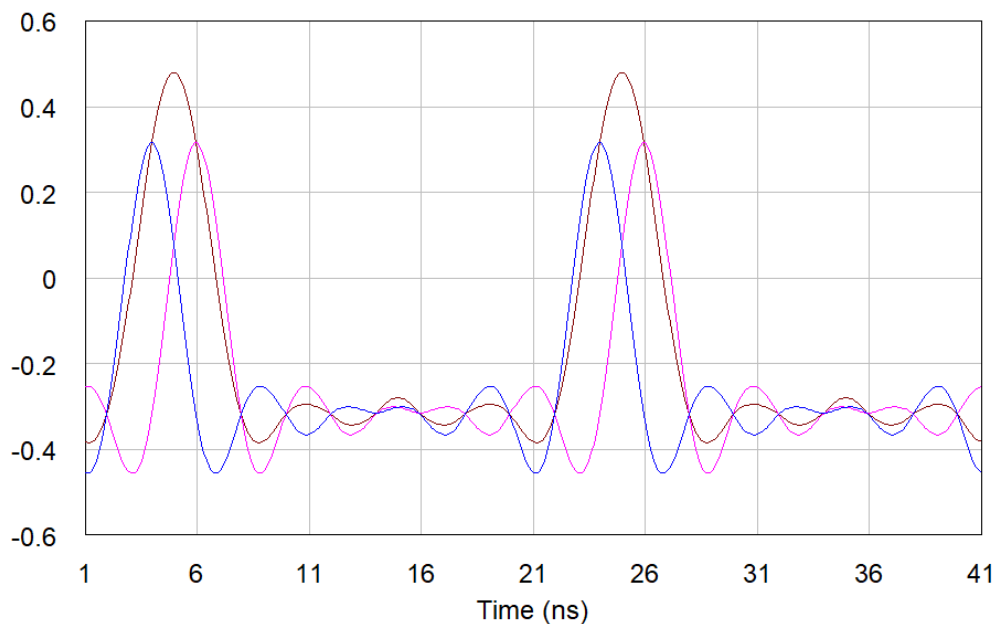


Рисунок 5.1 – Осциллограммы цифровых символов, передаваемых импульсами Найквиста с нулевым коэффициентом сглаживания

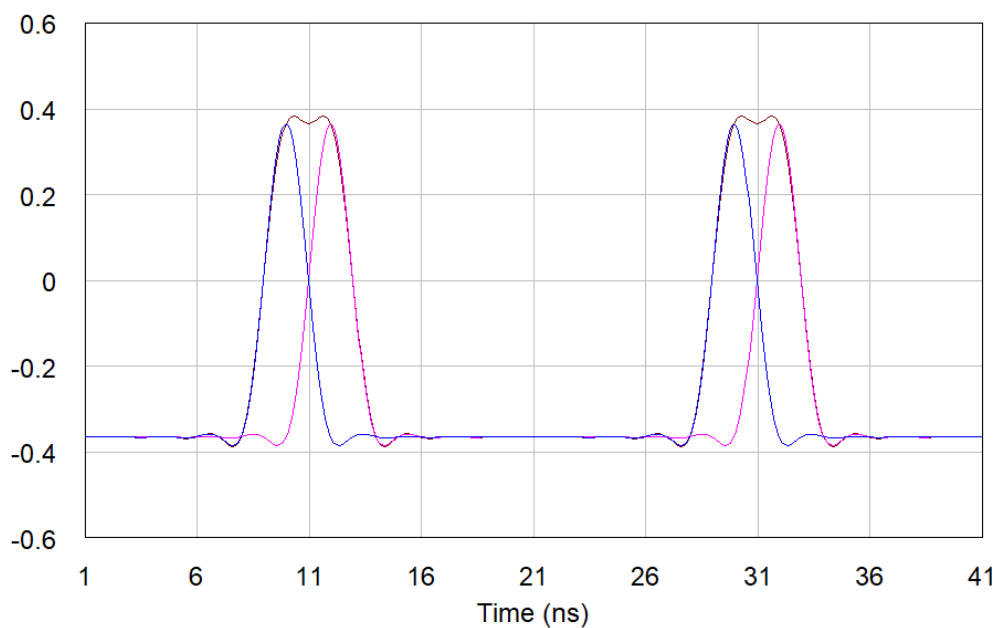


Рисунок 5.2 – Осциллограммы цифровых символов, передаваемых импульсами Найквиста с единичным коэффициентом сглаживания

5.4 Контрольная работа (письменный вариант)

Вариант 1

1. Межсимвольная интерференция. Причины возникновения и методы борьбы с ней.

2. Распределение передаточной функции фильтра Найквиста между приемником и передатчиком.
3. Корректор передаточной функции цифровых УПОС с обратной связью по решению.
4. Случайный джиттер. Его особенности и характеристики.
5. Цифровые амплитудные детекторы.

Вариант 2

1. Фильтры Найквиста. Приподнятый косинус.
2. Использование фильтров Гаусса и Чебышева в тракте основной селекции цифровых УПОС.
3. Определение и основные характеристики джиттера.
4. Детерминированный джиттер. Его особенности и характеристики.
5. Цифровые амплитудные ограничители.

Вариант 3

1. Реализация фильтров Найквиста в УПОС с канальным кодированием «без возвращения к нулю».
2. Трансверсальные корректоры передаточной функции цифровых УПОС.
3. Классификация составляющих джиттера.
4. Преобразователь Гильберта и его использование в цифровых УПОС.
5. Цифровые частотные детекторы.

5.5 Контрольная работа (тесты)

Вопрос 1. Что такое межсимвольная интерференция?

- 1) наложение символьных импульсов, при котором сигнал от соседних импульсов имеет ненулевые значения в момент взятия текущего отсчета;
- 2) взаимная модуляция одного символьного импульса другим на нелинейностях системы связи;
- 3) любое наложение символьных импульсов в цифровой системе связи;
- 4) наложение символьных импульсов, при котором сигнал от соседних импульсов имеет нулевые значения в момент взятия текущего отсчета.

Вопрос 2. Верно ли, что для исключения межсимвольной интерференции символьный импульс должен полностью завершиться к началу следующего?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 3. Отметьте все случаи, в которых будет возникать межсимвольная интерференция.

Выберите один или несколько ответов:

- 1) безынерционные нелинейные искажения;
- 2) неравномерная АЧХ тракта;
- 3) отклонение коэффициента передачи от номинального значения;
- 4) отклонение задержки сигнала в тракте от номинального значения;
- 5) нелинейно-инерционные искажения;
- 6) неравномерная ФЧХ тракта.

Вопрос 4. Что такое импульс Найквиста?

- 1) любая функция времени, в которой максимум окружают два эквидистантных нуля;

- 2) функция $\exp[-(t/\tau)^2]$;
- 3) любая функция времени с нулями, расположенными в равномерно расположенных точках;
- 4) функция $\sin(x)/x$;
- 5) любая функция времени с нулями, расположенными в равномерно расположенных точках за исключением одной такой точки.

Вопрос 5. Верно ли, что спектр импульсов Найквиста обязательно должен быть близок к прямоугольному?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 6. К чему приводит сглаживание спектра фильтра Найквиста (путем регулирования коэффициента сглаживания)?

- 1) к уменьшению амплитуды основного импульса;
- 2) во временной области наблюдаемые последствия практически отсутствуют;
- 3) к исчезновению нулей (по крайней мере, некоторых);
- 4) к изменению закона расположения нулей на оси времени;
- 5) к уменьшению осцилляций за пределами основного импульса.

Вопрос 7. Что значит "коэффициент сглаживания равен единице"?

- 1) в импульсе полностью подавлены осцилляции;
- 2) спектр импульса Найквиста вдвое шире минимально допустимого значения;
- 3) спектр импульса Найквиста в точности соответствует минимально допустимому;
- 4) нет никакого сглаживания;
- 5) импульс в точности соответствует функции $\sin(x)/x$.

8. Если вместо дельта-функций на вход фильтра Найквиста подать прямоугольные импульсы длительностью в символьный интервал (код NRZ), то как нужно изменить АЧХ фильтра Найквиста, чтобы на его выходе по-прежнему наблюдались импульсы Найквиста?

- 1) усилить верхние частоты по закону $\omega/\sin(\omega)$;
- 2) усилить верхние частоты по закону $\sin(\omega)/\omega$;
- 3) усилить верхние частоты пропорционально частоте;
- 4) никак; в обоих случаях на выходе фильтра будут импульсы Найквиста;
- 5) дополнительно ослабить верхние частоты.

Вопрос 9. Где в системе связи должен располагаться фильтр Найквиста?

- 1) только в приемнике;
- 2) и в передатчике, и в приемнике с обычной для фильтра Найквиста АЧХ;
- 3) только в передатчике;
- 4) и в передатчике, и в приемнике с АЧХ типа «корень из Найквиста».

Вопрос 10. Что такое импульс Гаусса?

- 1) функция $\sin(x)/x$;
- 2) функция $\exp[-(t/\tau)^2]$;
- 3) функция $\exp[-(t/\tau)^{-2}]$;
- 4) функция $\exp(-t/\tau)$.

Вопрос 11. Каково главное полезное качество импульса Гаусса для систем связи?

- 1) импульсная характеристика максимально гладкая;
- 2) минимально возможная ширина спектра;

- 3) импульсная характеристика максимально близка к прямоугольной;
- 4) минимальная межсимвольная интерференция;
- 5) импульсная характеристика полностью укладывается в допустимый диапазон амплитуд (0...100%).

Вопрос 12. Если в системе связи по каким-либо причинам возникла межсимвольная интерференция, то как должен действовать специальный корректор, чтобы устранить межсимвольную интерференцию?

- 1) привести передаточную функцию приемника к передаточной функции фильтра Найквиста;
- 2) привести АЧХ радиоприемника к равномерной;
- 3) привести передаточную функцию системы связи к передаточной функции фильтра Найквиста;
- 4) привести АЧХ системы связи к равномерной;
- 5) привести АЧХ системе связи к АЧХ фильтра Найквиста;
- 6) привести АЧХ радиоприемника к АЧХ фильтра Найквиста.

Вопрос 13. В чем основная математическая особенность матричного уравнения, из которого отыскивают коэффициенты трансверсального корректора?

- 1) матрица в уравнении не квадратная, а система является недоопределенной;
- 2) циркулянтный характер матрицы;
- 3) матрица в уравнении не квадратная, а система является переопределенной;
- 4) матрица уравнения является теплицевой.

Вопрос 14. В чем состоит метод обращения в нуль незначущих коэффициентов при отыскании коэффициентов трансверсального корректора?

- 1) в матрице уравнения отбрасывают верхнюю и нижнюю четверть строк;
- 2) в матрице уравнения отбрасывают верхнюю половину строк;
- 3) в матрице уравнения оставляют верхнюю и нижнюю четверть строк;
- 4) в матрице уравнения отбрасывают нижнюю половину строк.

15. В чем состоит метод отыскания коэффициентов трансверсального корректора с минимальной среднеквадратической ошибкой?

- 1) находят псевдообратную матрицу вида $(X^T X)^{-1} X^T$ и далее решают матричное уравнение с квадратной матрицей;
- 2) коэффициенты корректора варьируют так, чтобы минимизировать (в среднеквадратическом смысле) напряжение от тестового одиночного импульса в позициях соседних импульсов;
- 3) обращают матрицу в уравнении и этим находят решение.

Вопрос 16. Джиттер это...

- 1) случайное отклонение амплитуды импульсного или цифрового сигнала от номинального значения;
- 2) дрожание фронтов импульсного или цифрового сигнала;
- 3) дрожание фазы гетеродина приемника относительно фазы несущего сигнала;
- 4) смещение цифрового блока данных на целое количество символьных интервалов.

Вопрос 17. Как построить тренд джиттера?

- 1) взять несколько значений отклонения фронта от номинального значения и методом наименьших квадратов определить наличие линейной тенденции к нарастанию или убыванию.

- 2) взять несколько значений отклонения фронта от номинального значения и методом наименьших квадратов определить наличие регулярной периодической составляющей в джиттере.
- 3) Для каждого фронта импульса определить его временное положение (горизонтальная ось) и отклонение от номинального положения (вертикальная ось).

Вопрос 18. Как найти спектр джиттера?

- 1) взять Z-преобразование от тренда;
- 2) взять преобразование Фурье от тренда джиттера;
- 3) взять преобразование Фурье от сигнала, подверженного джиттеру;
- 4) взять преобразование Гильберта от сигнала, подверженного джиттеру.

Вопрос 19. Что откладывают по осям при построении гистограммы джиттера?

- 1) по горизонтали - текущее время, по вертикали - распределение вероятности сигнала, подверженного джиттеру;
- 2) по горизонтали - интервалы времени, по вертикали - относительное количество значений джиттера, попавших в эти интервалы;
- 3) по горизонтали - текущее время, по вертикали - плотность распределения вероятности сигнала, подверженного джиттеру.

Вопрос 20. Что показывает U-кривая?

- 1) зависимость ширины глазка на глазковой диаграмме от относительного количества битовых ошибок;
- 2) зависимость относительного количества битовых ошибок от допускаемой ширины глазка на глазковой диаграмме;
- 3) зависимость количества битовых ошибок от отношения сигнал/шум;
- 4) зависимость количества битовых ошибок от высоты глазка на глазковой диаграмме;
- 5) зависимость высоты глазка на глазковой диаграмме от допустимого количества битовых ошибок.

Вопрос 21. Верно ли, что случайный джиттер с плотностью распределения вероятности тренда, в точности соответствующей гауссовской, имеет бесконечную амплитуду?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 22. Длительность битового интервала 100 нс. При каком среднеквадратическом значении джиттера битовые ошибки станут отличными от нуля?

- 1) 90 нс;
- 2) 33 нс;
- 3) отличные от нуля ошибки будут при любом ненулевом среднеквадратическом значении случайного джиттера;
- 4) 50 нс;
- 5) 100 нс;
- 6) 10 нс;
- 7) 1 нс.

Вопрос 23. Как выглядит гистограмма случайного джиттера?

Выберите один ответ на рисунке 5.1.

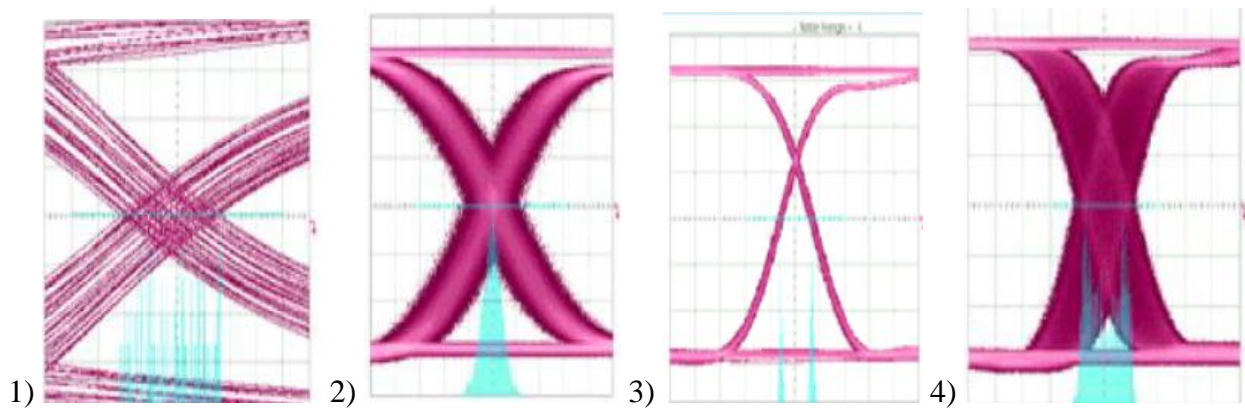


Рисунок 5.1 – Гистограммы сигналов при наличии джиттера

Вопрос 24. Если в системе присутствует периодический джиттер, то где его можно увидеть именно как периодический сигнал?

- 1) на глазковой диаграмме;
- 2) на гистограмме джиттера;
- 3) на графике передаваемого в системе сигнала;
- 4) на тренде джиттера;
- 5) на спектре джиттера.

Вопрос 25. Как выглядит гистограмма периодического джиттера?

Выберите один ответ на рисунке 5.1.

26. Верно ли, что межсимвольную интерференцию можно охарактеризовать и как джиттер?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 27. Как выглядит гистограмма межсимвольной интерференции?

Выберите один ответ на рисунке 5.1.

Вопрос 28. К какому джиттеру приводит погрешность установки порогового уровня при импульсных сигналах с конечной крутизной фронта?

- 1) к периодическому джиттеру с частотой следования символов;
- 2) к периодическому джиттеру с частотой вдвое меньше частоты следования символов;
- 3) к периодическому джиттеру с частотой вдвое больше частоты следования символов;
- 4) ни к какому. Скважность цифрового сигнала меняется, но это нельзя назвать джиттером.

Вопрос 29. Как выглядит гистограмма джиттера из-за погрешности по скважности?

Выберите один ответ на рисунке 5.1.

Вопрос 30. Какие узлы приемо-передающего тракта могут быть источником субгармонического джиттера (выберите все варианты)?

Выберите один или несколько ответов:

- 1) делители частоты;
- 2) умножители частоты;
- 3) системы автоматической регулировки усиления;
- 4) системы фазовой автоподстройки частоты;

5) системы с мультиплексированием нескольких каналов в один.

5.6 Краткие сведения по лабораторным работам

Лабораторная работа по данной теме выполняется на цифровом трансивере National Instruments серии USRP-2900 и посвящена изучению формирования импульсов в цифровой связи. Руководство к лабораторной работе приведено в [9].

5.7 Указания к самостоятельной работе

На самостоятельную работу выносятся подготовка к текстовой контрольной работе при очном изучении курса или подготовка к тесту и выполнение теста при дистантном обучении.

Кроме того, на самостоятельное изучение может быть вынесено изучение руководства к лабораторной работе [9] для ее более быстрого и результативного выполнения на занятии.

6 ОСОБЕННОСТИ ПРИЕМА ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ

6.1 Краткие сведения из лекционного курса

В системах с шумоподобными сигналами (ШПС) цифровые символы передают не одиночными импульсами, а сигналом сложной заранее заданной формы (ШПС). Такие сигналы имеют более широкий спектр (spread spectrum), в результате занятый частотный диапазон оказывается «недогруженным» одним абонентом. Но варьируя форму ШПС в этом же диапазоне можно организовать связь для других абонентов.

Кроме того, системы с ШПС малочувствительны к помехам в занятом частотном диапазоне, в том числе от обычных систем связи. Они обладают большей скрытностью и устойчивостью к несанкционированному съему информации.

В качестве ШПС используются линейно-частотно модулированные сигналы, цифровые псевдослучайные последовательности, короткие случайно расположенные импульсы, сигналы с прыгающей частотой.

Для приема ШПС нужно решить две специфические задачи: правильно определить временное положение ШПС-паттерна (синхронизация) и продетектировать информационный символ, обозначенный нужным ШПС-паттерном, подавив другие ШПС-сигналы и помехи в этом же диапазоне частот. Детектирование (демодуляция) в ШПС-системах выполняется либо синхронными демодуляторами (корреляторами), либо асинхронными (согласованными фильтрами). Синхронные фильтры менее чувствительны к многолучевости и другим помехам, но требуют предварительной синхронизации с ШПС-потокком.

Системы связи с прыгающей частотой строятся как и обычные узкополосные системы связи, но несущая частота в передатчике и приемнике синхронно и скачкообразно изменяется по разрешенной сетке частот.

Синхронизацию в системах с ШПС можно разделить на две фазы: начальный поиск (обнаружение) и отслеживание. Начальный поиск выполняется обычно скользящим коррелятором (коррелятором, в котором ШПС-паттерн на опорном входе перемещается по времени до получения максимума взаимокорреляционной функции). Обнаружение сигнала в системах с прыгающей частотой выполняется системой полосовых фильтров, настроенных на разрешенные в системе частоты несущей. Выходные сигналы полосовых фильтров объединяются через линии задержки в той последовательности, в которой несущая занимает соответствующие частоты. Отслеживание ШПС осуществляется обычно корреляторами с «вилкой» – когда ШПС-паттерн располагается чуть раньше и чуть позже правильного положения. Сравнение выходных сигналов корреляторов с «опаздывающим» и «опережающим» опорным паттерном позволяет подстраивать по частоте и фазе генератор частоты следования цифровых символов в приемнике.

6.2 Расчетные задания (задачи)

По вариантам задается короткая символьная последовательность (например, 1011). Кроме того, задается бинарный шумоподобный символьный паттерн (например, 11101101), обозначающий передачу 1 или 0. Имеем в виду, что если передается 1, то паттерн передается как есть, если передается 0, то паттерн двоично инвертируется (1 в нем заменяется на 0 и наоборот).

Требуется построить график, изображающий заданную последовательность 1011, переданную с использованием указанного символьного паттерна. На рисунке нужно привести поясняющую разметку (например, где кончается один символ и начинается другой).

Строить графики допускается в любой удобной среде (например, MathCAD).

6.3 Контрольная работа (тест)

Вопрос 1. Что такое шумоподобный сигнал?

- 1) сигнал, который при заданной длительности имеет значительно более широкий спектр, чем простой видеоимпульс такой же длительности;
- 2) отрывок случайного процесса; всегда выглядит как шум;
- 3) имитация шума (сигнала с хаотической формой); в действительности представляет собой детерминированную функцию.

Вопрос 2. В системе связи обычный видеоимпульс, обозначающий передаваемый цифровой символ, имеет длительность 1 мкс. Его заменяют шумоподобным паттерном, чтобы перейти к шумоподобной связи. Скорость передачи данных должна остаться неизменной. Какую длительность при этом должен иметь шумоподобный паттерн?

- 1) 1 мкс;
- 2) длительность шумоподобного паттерна должна быть во столько раз меньше 1 мкс, во сколько шире его полоса по сравнению с полосой простого видеоимпульса;
- 3) длительность шумоподобного паттерна должна быть во столько раз больше 1 мкс, во сколько шире его полоса по сравнению с полосой простого видеоимпульса.

Вопрос 3. Отметьте все сигналы, которые относятся к шумоподобным по русскоязычной литературе.

- 1) сигналы с разделением по ортогональным частотам (OFDM);
- 2) m -последовательности;
- 3) линейно частотно-модулированные;
- 4) сигналы с прыгающей частотой;
- 5) сигналы с модуляцией без разрыва фазы;
- 6) сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией;
- 7) импульсные сигналы с большой скважностью.

Вопрос 4. Возможна ли работа других передатчиков в частотном диапазоне, который уже занят ШПС-передатчиком?

- 1) невозможна; будут неприемлемые взаимные помехи;
- 2) возможна и если передача будет вестись такими же ШПС-передатчиками, и обычными передатчиками с простыми модулирующими сигналами;
- 3) возможна, только если это такие же ШПС-передатчики, использующие другую форму шумоподобного паттерна.

Вопрос 5. Как получается модулирующий сигнал в ШПС-передатчике?

- 1) информационный поток и сигнал генератора псевдошумовой последовательности перемножаются;
- 2) если передается «единица», то шумоподобный паттерн передается, если передается «ноль», то нет;
- 3) информационный поток и сигнал генератора псевдошумовой последовательности складываются;
- 4) информационный поток и сигнал генератора псевдошумовой последовательности складываются по модулю 2.

Вопрос 6. В основе генератора m -последовательности лежит линия задержки с отводами. Как сигналы с этих отводов используются далее?

- 1) поступают на перемножитель и далее на выход;
- 2) поступают на сумматор и далее на вход линии задержки;

- 3) поступают на перемножитель и далее на вход линии задержки;
- 4) поступают на сумматор и далее на выход.

Вопрос 7. Как устроен асинхронный демодулятор ШПС?

- 1) это линейный фильтр с передаточной функцией, которая с точностью до постоянного коэффициента является комплексно-сопряженной со спектром ШПС;
- 2) устройство, содержащее в своей памяти «шаблон» нужного ШПС. Оно непрерывно (асинхронно) отслеживает входной сигнал и выдает отклик, если во входном сигнале обнаруживается фрагмент, совпадающий с шаблоном;
- 3) это линейный фильтр с передаточной функцией, которая с точностью до постоянного коэффициента совпадает со спектром ШПС;
- 4) это линейный фильтр, АЧХ которого с точностью до постоянного коэффициента совпадает со спектром мощности ШПС.

Вопрос 8. Что представляет собой синхронный демодулятор ШПС?

- 1) устройство, выдающее автокорреляционную функцию входного сигнала;
- 2) перемножитель входного сигнала с шаблоном искомого ШПС;
- 3) это схема совпадения, выдающая отклик, если входной сигнал точно совпадает с искомым шаблоном.

Вопрос 9. Если к приемнику разными путями приходят две задержанных копии переданного ШПС, то на выходе демодулятора будет сигнал, соответствующий одному из лучей или обоим сразу?

- 1) асинхронный демодулятор будет выдавать сигнал двух лучей, а синхронный – одного;
- 2) и синхронный, и асинхронный демодулятор будут выдавать сигнал обоих лучей;
- 3) и синхронный, и асинхронный демодулятор будут выдавать сигнал только одного луча;
- 4) асинхронный демодулятор будет выдавать сигнал одного луча, а синхронный – двух.

Вопрос 10. Верно ли, что демодулятор ШПС в приемнике настраивается только на один из сигналов (паттернов) в семействе, а не на все семейство?

- 1) верно;
- 2) неверно.

Вопрос 11. Допустим у нас есть 10 частотных каналов. На выбор мы можем или каждому абоненту выделить один частотный канал, или каждого из абонентов постоянно перебрасывать с одной частоты на другую в разрешенной сетке каналов. Чем второй вариант лучше?

- 1) большей устойчивостью к многолучевому распространению и большей скрытностью связи;
- 2) только большей скрытностью связи;
- 3) ничем, только лишнее усложнение системы;
- 4) только большей устойчивостью к многолучевому распространению.

6.4 Указания к самостоятельной работе

На самостоятельную работу выносятся подготовка к выполнению теста.

7 ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ

7.1 Области применения, виды принимаемых сигналов и задачи УПОС

1. Области применения и задачи УПОС.
2. Способы организации коллективного доступа к эфиру.
3. Семейство форматов модуляции PSK.
4. Семейство форматов модуляции QPM.
5. Модуляция OFDM.

7.2 Структурные схемы приемников

6. Приемники прямого детектирования.
7. Приемники прямого усиления.
8. Приемники с преобразованием частоты. Их общие преимущества.
9. Супергетеродинные приемники.
10. Побочные каналы приема в супергетеродине и борьба с ними.
11. Инфрадин.
12. Супергетеродины с несколькими преобразованиями частоты.
13. Приемники прямого преобразования.
14. Устройство приемников прямого преобразования без ФАПЧ гетеродина.
15. Программно-определяемое радио.

7.3 Элементы и узлы УПОС

16. Приемные антенны.
17. Согласование с приемной антенной.
18. Входные цепи: структурная схема и варианты принципиальных схем.
19. Расчет одноконтурной входной цепи.
20. Перестройка входных цепей. Удлиненные и укороченные антенные цепи.
21. Усилители радиочастоты: требования, параметры и схемотехника.
22. Шумы в УПОС: определение чувствительности приемника; физика возникновения, закономерности накопления и характеристика шумов.
23. Усилители промежуточной частоты: требования и схемотехника.
24. Принцип действия преобразователей частоты.
25. Нелинейные искажения в тракте УПОС и их характеристика.
26. Схемотехника преобразователей частоты.
27. Преобразователи частоты с фазовым подавлением зеркального канала.
28. Автогенераторы. Обратное преобразование шумов гетеродина.
29. Распределенная основная селекция.
30. Сосредоточенная основная селекция.
31. Пьезоэлектрические фильтры сосредоточенной селекции.

7.4 Автоматические регулировки в УПОС

32. Задачи и варианты структурных схем АРУ.
33. Основные параметры и характеристики АРУ. Простая и задержанная АРУ.
34. АРУ с прямым, обратным и комбинированным регулированием.
35. Схемы регуляторов систем АРУ.
36. Цифровая АРУ.
37. Статические и астатические системы АПЧ.
38. Следящие системы АПЧ и системы стабилизации частоты.

7.5 Особенности цифровых УПОС

39. Межсимвольная интерференция. Причины возникновения и методы борьбы с ней.

40. Фильтры Найквиста. Приподнятый косинус.
41. Реализация фильтров Найквиста в УПОС с канальным кодированием «без возвращения к нулю».
42. Распределение передаточной функции фильтра Найквиста между приемником и передатчиком.
43. Использование фильтров Гаусса и Чебышева в тракте основной селекции цифровых УПОС.
44. Трансверсальные корректоры передаточной функции цифровых УПОС.
45. Корректор передаточной функции цифровых УПОС с обратной связью по решению.
46. Определение и основные характеристики джиттера.
47. Классификация составляющих джиттера.
48. Случайный джиттер. Его особенности и характеристики.
49. Детерминированный джиттер. Его особенности и характеристики.

7.6 Особенности УПОС шумоподобных сигналов (ШПС)

50. Общие особенности систем связи с шумоподобными сигналами.
51. Используемые разновидности ШПС, генерирование ШПС, ШПС-передатчик.
52. Асинхронная демодуляция ШПС.
53. Синхронная демодуляция ШПС.
54. Системы связи с прыгающей частотой.

7.7 Разнесенный прием радиосигналов

55. Способы разнесения каналов при разнесенном приеме радиосигналов.
56. Методы комбинирования сигналов при разнесенном приеме радиосигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов Э.В. Устройства приема и обработки сигналов: конспект лекций. – Томск: ТУСУР, 2019. – 124 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2016. – 1099 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Семенов Э.В. Исследование канала радиосвязи на базе приемно-передающего комплекса National Instruments USRP-2920: методические указания к лабораторной работе. – Томск: ТУСУР, 2017. – 19 с.
5. Румянцев К.Е. Прием и обработка сигналов: сборник задач и упражнений : учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 368 с.
6. Семенов Э.В. Изучение малошумящего усилителя: методические указания к лабораторной работе. – Томск: ТУСУР, 2020. – 6 с.
7. Семенов Э.В. Изучение цифрового частотного детектора: методические указания к лабораторной работе. – 2017. – 4 с.
8. Семенов Э.В. Изучения преобразователя частоты: методические указания к лабораторной работе. Томск, ТУСУР, 2020. – 5 с.
9. Семенов Э.В. Изучение формирования импульсов в цифровой связи: методические указания к лабораторной работе. – Томск, 2018. – 17 с.