



# МИР радиоэлектроники

Танг Т. Чан

Высокоскоростная  
цифровая обработка  
сигналов  
и проектирование  
аналоговых систем

Перевод с английского  
К.В. Юдинцева

под редакцией  
Г.А. Егорочкина

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2013

*Издание осуществлено при поддержке  
ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ»*



УДК 621.391 + 004.383.3  
ББК 32.811

**Ч-18 Танг Т. Чан**

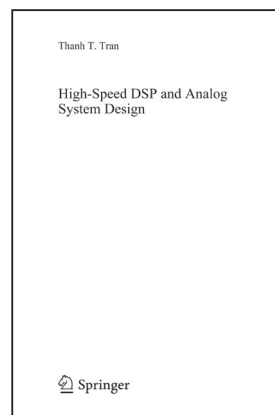
**Высокоскоростная цифровая обработка сигналов и проектирование аналоговых систем**

**Москва: Техносфера, 2013. – 192 с., ISBN 978-5-94836-340-0**

Книга основана на 25-летнем опыте работы Танг Т.Чан в области высокоскоростной цифровой обработки сигналов и компьютерных систем, а также на его курсах по проектированию цифровых и аналоговых систем в Университете Райса (Техас, США). Издание содержит практические советы для инженеров по экономичному конструированию, системному моделированию и эффективной практике проектирования цифровых и аналоговых систем. В книге приведены примеры проектирования аудио-, видео- и аналоговых фильтров, памяти DDR и блоков питания. Книга предназначена для студентов старших курсов и аспирантов, исследователей и профессионалов в области обработки сигналов и системного проектирования.

**УДК 621.391 + 004.383.3  
ББК 32.811**

Translation from English language edition:  
High-Speed DSP and Analog System Design  
by Thanh T. Tran  
Copyright © 2010 Springer US  
Springer US is a part of Springer Science+Business Media  
All Rights Reserved



© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,  
оригинал-макет, оформление  
Качество печати иллюстраций соответствует качеству  
файлов, предоставленных издательством Springer

**ISBN 978-5-94836-340-0**  
**ISBN 978-1-4419-6308-6 (англ.)**

## Содержание

Предисловие научного редактора перевода .....	8
Вступление .....	10
Благодарности .....	12
Об авторе .....	13
<b>Глава 1.</b> Проблемы проектирования систем ЦОС .....	14
1.1. Обзор высокоскоростных систем ЦОС .....	15
1.2. Проблемы систем цифровой обработки аудиосигнала .....	17
1.3. Проблемы систем цифровой обработки видеосигнала .....	19
1.4. Проблемы ЦОС в системах связи .....	20
Литература .....	22
<b>Глава 2.</b> Эффекты линий передачи .....	23
2.1. Теория линий передачи .....	23
2.2. Моделирование параллельных нагрузок .....	28
2.3. Практические соображения по линиям передачи .....	30
2.4. Результаты моделирований и экспериментальных исследований линий передачи .....	31
2.4.1. ЛП без подключения нагрузки или сопротивления источника .....	31
2.4.2. ЛП с последовательным подключением источника .....	33
2.5. Влияние контура заземления на линию передачи .....	34
2.6. Минимизация влияния эффектов линии передачи .....	36
Литература .....	37
<b>Глава 3.</b> Влияние перекрестных помех .....	38
3.1. Цепи обратных токов .....	38
3.2. Перекрестные помехи, вызванные излучением .....	43
3.3. Выводы .....	47
Литература .....	48
<b>Глава 4.</b> Вопросы проектирования источников питания .....	49
4.1. Архитектуры источников питания (ИП) .....	49
4.2. Об архитектуре источников питания систем ЦОС .....	57
4.2.1. Вопросы последовательности подачи питания .....	62
4.3. Выводы .....	64
Литература .....	65
<b>Глава 5.</b> Развязка источника питания .....	66
5.1. Способы развязки источника электропитания .....	66
5.1.1. Характеристики конденсаторов .....	68
5.1.2. Характеристики катушки индуктивности .....	71
5.1.3. Характеристики ферритовых бусинок .....	72
5.1.4. Главный эмпирический метод развязки .....	73

5.1.5. Аналитический метод развязки .....	75
5.1.6. Размещение развязывающих конденсаторов .....	86
5.2. Подавление высокочастотных помех .....	87
5.2.1. Проектирование Pi-фильтра .....	88
5.2.2. Проектирование T-фильтра .....	92
5.3. Выводы .....	95
Литература .....	96
<b>Глава 6. Системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) .....</b>	<b>97</b>
6.1. Аналоговые ФАПЧ (АФАПЧ) .....	97
6.1.1. Дрожание фазы системы ФАПЧ .....	99
6.2. Цифровая система ФАПЧ .....	101
6.3. Методы развязки системы ФАПЧ .....	104
6.3.1. Pi- и T-фильтры .....	104
6.3.2. Стабилизатор линейного напряжения .....	107
6.4. Заключение .....	109
Литература .....	109
<b>Глава 7. Обзор преобразователей данных .....</b>	<b>110</b>
7.1. Системы цифровой обработки сигнала .....	110
7.2. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) .....	111
7.2.1. Дискретизация (осуществление выборок) .....	113
7.2.2. Шум квантования .....	114
7.3. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) .....	118
7.4. Практические рекомендации по проектированию преобразователей данных .....	120
7.4.1. Разрешающая способность и отношение сигнал – шум .....	120
7.4.2. Частота выборки (дискретизации) .....	120
7.4.3. Диапазон входных и выходных напряжений .....	121
7.4.4. Дифференциальная нелинейность (ДНЛ) .....	122
7.4.5. Интегральная нелинейность (ИНЛ) .....	123
7.5. Заключение .....	124
Литература .....	125
<b>Глава 8. Проектирование аналогового фильтра .....</b>	<b>126</b>
8.1. Фильтры защиты от наложения спектров .....	126
8.1.1. Характеристики пассивных и активных фильтров .....	126
8.1.2. Проектирование пассивного фильтра .....	127
8.1.3. Проектирование активного фильтра .....	130
8.1.4. Основы теории работы операционного усилителя .....	130
8.1.5. Связь по постоянному и переменному току .....	137
8.1.6. Проектирование активного фильтра первого порядка .....	144
8.1.7. Проектирование активного фильтра второго порядка .....	150
8.2. Заключение .....	154
Литература .....	155

<b>Глава 9. Вопросы проектирования подсистем памяти</b> .....	156
9.1. Обзор динамической DDR-памяти .....	156
9.1.1. Цикл записи динамической памяти .....	157
9.1.2. Цикл считывания динамической памяти .....	157
9.2. Целостность сигнала динамической памяти .....	158
9.3. Пример проектирования системы динамической памяти .....	160
Литература .....	162
<b>Глава 10. Планировка топологии печатной платы</b> .....	163
10.1. Наложение слоев печатных плат .....	163
10.2. Микрополосковая и полосковая линии передачи .....	165
10.3. Плоскость изображения .....	166
10.4. Заключение .....	167
Литература .....	168
<b>Глава 11. Электромагнитные помехи (ЭМИ)</b> .....	169
11.1. Обзор части 15В правил Федеральной комиссии связи (ФКС) .....	169
11.2. Основы теории ЭМИ .....	170
11.3. Цифровые сигналы .....	172
11.4. Токовые контуры .....	173
11.5. Источник питания .....	175
11.6. Линия передачи .....	176
11.7. Плоскости питания и заземления .....	178
11.8. Заключение: правила по снижению уровня ЭМИ .....	179
Литература .....	180
<b>Список сокращений</b> .....	182
<b>Предметный указатель</b> .....	184

## Предисловие научного редактора перевода

В последние годы дисциплина «Цифровая обработка сигналов» (ЦОС) и ее модификации все чаще включаются в учебные планы образовательных программ многих российских высших учебных заведений (вуз). Семинары и презентации ведущих фирм, работающих в сфере цифровых технологий обработки сигналов, традиционно собирают значительное число заинтересованных специалистов. По всему миру проводятся научно-технические конференции в целях консолидации и поддержки ученых, работающих в области передовых информационных технологий реального времени.

Столь высокий интерес к данной области неслучаен. основополагающим стимулом развития цифровых технологий является то, что стоимость аппаратуры ЦОС продолжает неуклонно снижаться при растущей при этом производительности вычислительных операций. Также нельзя не отметить высокую гибкость и универсальность систем ЦОС, что позволяет оперативно перепрограммировать их на выполнение новых задач без изменения аппаратной части. Именно благодаря интенсивному развитию и широкому внедрению цифровых технологий на рубеже тысячелетий стал возможен качественный скачок в сфере телекоммуникаций и информатизации общества. При этом научно-технический потенциал методов ЦОС отнюдь не исчерпан и перспективы их применения простираются далеко за пределы сегодняшнего дня.

В настоящее время как в России, так и за рубежом издается немало специализированной литературы, посвященной вопросам ЦОС. При этом важно понимать, что обширность темы (и сопутствующих ей приложений) практически не позволяет целиком охватить ее в одной работе. Поэтому книга, посвященная данной тематике, должно быть как можно больше — как отечественных, так и переводных.

Ввиду сказанного актуальность и практическая значимость монографии доктора Танг Чана не вызывает сомнений. Книга «Проектирование быстродействующих аналоговых и цифровых систем обработки сигналов» основана на более чем 25-летнем опыте работы автора в области конструирования высокоскоростных систем ЦОС, компьютеров и аналоговых систем. Особую ценность монография приобретает в силу того, что доктор Чан является не только обладателем богатого практического опыта в данной отрасли, но и ведет преподавательскую деятельность по проектированию цифровых и аналоговых систем в Университете Райса (Хьюстон, США), что является основанием для высокой оценки книги с методической точки зрения.

Содержание книги тематически разделено на 11 глав, в заключение которых автор обобщает написанное и приводит список соответствующей литературы, что, безусловно, способствует лучшему усвоению материала и повышает его информативность. Пожалуй, главной особенностью монографии является ее подчеркнуто практическая направленность. Буквально с первых страниц доктор Чан отмечает, что его книга содержит практические советы и методические указания для инженеров — разработчиков быстродействующих систем аналоговой и цифровой обработки сигналов. И на протяжении всей книги автор неизменно следует принятой методике изложения, увязывая теоретические вопросы с конкретными инженерными задачами, стоящими перед проектировщиками.

Кроме того, в отличие от подавляющего большинства публикаций, в настоящей монографии значительное внимание уделено не только сугубо научно-техническим вопросам, но и экономическим факторам. Описание предлагаемых автором методов проектирования систем ЦОС включает в себя конкретные рекомендации по их конструированию, направленные на повышение экономической эффективности за счет снижения затрат на поздней стадии разработки, связанных с какими-либо доработками.

Предложенный доктором Чаном подход с акцентом на минимизацию уровня шума на первоначальном этапе разработки обладает несомненной новизной по отношению к традиционной методологии проектирования устройств, в рамках которой во главу угла ставятся в первую очередь вопросы функциональности и быстродействия, а проблемы, связанные с шумом и паразитными сигналами, принимаются во внимание только на завершающих этапах проектирования. Перспективность применения подхода доктора Чана очевидна в условиях возрастающей негативной роли шума, результатом которой в настоящее время становится немалое число новых конструкций, не удовлетворяющих требованиям по электромагнитной совместимости.

Благодаря знанию автором «подводных камней» проектирования систем ЦОС удается не только избежать наиболее распространенных ошибок, но и одновременно повысить качество и надежность конечного продукта. Кроме того, следует особо отметить, что в книгу наряду с ЦОС включено описание аналоговых систем, что является нехарактерным для подобного рода литературы. Несомненно, что столь обстоятельный подход к делу значительно повышает ценность монографии и существенно расширяет область знания читателя по рассматриваемым вопросам.

Приведенные в книге примеры проектирования касаются аудио- и видеосистем, а также систем связи, аналоговых активных и пассивных фильтров, DDR-памяти и источников питания. Отдельная глава (десятая) посвящена вопросам проектирования топологии печатной платы.

Вне всяких сомнений, монография доктора Чана является важным информационным ресурсом для инженеров-разработчиков, деятельность которых связана с конструированием высокоскоростных систем обработки сигналов как в аналоговой, так и в цифровой области. Книга также может оказаться полезной студентам старших курсов вузов и аспирантам, специализирующимся на обработке сигналов и проектировании систем. Надеюсь, что это издание долгое время будет оставаться востребованным отечественными разработчиками и исследователями.

В заключение хотелось бы выразить благодарность всему коллективу РИЦ «Техносфера» и в частности директору книгоиздательских программ С.А. Орлову за качественный перевод произведения и внесение ключевых примечаний (там, где это необходимо), способствующих правильному пониманию текста за счет подробного пояснения русскоязычному читателю используемой автором терминологии.

*Заместитель генерального директора  
ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ» по научной работе, д.т.н. Бляхман А.Б.*

## Вступление

Данная книга описывает методы проектирования быстродействующих систем аналоговой и цифровой обработки сигналов (ЦОС) и показывает общие причины возникновения проблем с шумами и электромагнитными помехами, с которыми постоянно сталкиваются инженеры. Материал книги построен на основе моего справочника по проектированию высокоскоростных систем ЦОС (Texas Instruments SPRU 889), моих курсов лекций по проектированию в университете Райса и моего собственного более чем 25-летнего опыта проектирования компьютеров и систем ЦОС. Книга дает практические советы инженерам и содержит:

- подсказки по экономически эффективному проектированию и моделированию систем, обеспечивающие минимизацию издержек на переработку проектов на следующих этапах и задержек с поставками продукции;
- 11 легкодоступных глав на 210 страницах;
- информацию об использовании правильных методик проектирования быстродействующих систем ЦОС и аналоговых систем, минимизирующих шумы компонентов и системы в целом;
- методические указания, применимые на любой стадии проектирования для уменьшения шума и паразитного излучения и предотвращения общих причин их возникновения с одновременным улучшением качества и надежности;
- конкретные примеры проектирования аудио- и видеоустройств, аналоговых фильтров, устройств с удвоенной скоростью передачи данных (DDR) и источников питания.

Включение в книгу описания аналоговых систем и связанных с ними вопросов не характерно для других книг по проектированию быстродействующих систем.

Эта книга предназначена для инженеров-практиков и составлена следующим образом.

- **Глава 1** рассматривает проблемы проектирования видео- и аудиосистем, а также систем связи.
- **Глава 2** содержит теорию линий передачи. С помощью моделирования целостного сигнала и лабораторных измерений демонстрируются результирующие виды различных сигналов.
- **Глава 3** показывает влияние перекрестных помех и способ уменьшения радиопомех.
- **Глава 4** дает обзор импульсных и линейных источников питания с акцентом на важности обеспечения последовательности схем включения питания и развязки источника питания.
- **Глава 5** содержит аналитические и общие методики развязки по питанию.
- **Глава 6** содержит обзор проектных решений для аналоговых и цифровых систем фазовой автоподстройки частоты (APLL и DPLL соответственно) и рекомендации по устранению шума из-за джиттера (дрожания фазы) APLL и DPLL.





- **Глава 7** представляет обзор преобразователей данных, методов дискретизации и квантования шума.
- **Глава 8** описывает проектирование аналоговых активных и пассивных фильтров, включая проектирование операционного усилителя с одно- и двухполярными источниками питания.
- **Глава 9** раскрывает конструкторские решения подсистем памяти. Включает обзор DDR, вопросов целостности сигнала и дает пример проектирования.
- **Глава 10** рассматривает вопросы пакетирования печатных плат и маршрутизации сигнала.
- **Глава 11** описывает источники электромагнитных помех (ЭМИ) и способы их уменьшения.

## Благодарности

Я хотел бы выразить благодарность многим моим коллегам по работе в компании Texas Instruments Inc., подвигнувшим меня на написание этой книги, а именно Кевину Джонсу — за выполнение лабораторных измерений, необходимых для проверки некоторых теоретических принципов, и моделирование, а также Кэти Уикс — за ее огромную поддержку по многим вопросам. Выражаю особую благодарность Дженнифер Маурер и Дженнифер Эванс из издательства «Спрингер» за то, что предоставили мне возможность написать данную книгу, за рецензирование и отличные советы. Без помощи и поддержки всех этих людей данная книга никогда бы не увидела свет.

У меня не хватает слов для выражения благодарности моему брату — Нхут Чану за неутомимый труд по рецензированию и редактированию каждой главы данной книги. Что касается моей дочери, Лили Чан, то она, вместо того чтобы отдыхать на Рождество после месяцев тяжелейшей работы в Массачусетском технологическом институте, добровольно взялась за редактирование всей рукописи, оказав мне неоценимую помощь.

Еще раз выражаю искреннюю благодарность Нхуту и Лили за их помощь! Наконец, я не перестаю поражаться своей жене, Нга, которая, работая на полной ставке в Hewlett Packard, умудрялась оказывать мне огромную поддержку и заботиться о детях. Она воистину великолепный друг и замечательная мама.

*Танг Т. Чан  
Хьюстон, Техас, 2010*

## Об авторе

Доктор Танг Т. Чан, являясь техническим руководителем в компании Texas Instruments Inc., имеет 25-летний опыт в области конструирования быстродействующих систем ЦОС, компьютеров и аналоговых систем. В настоящее время он является обладателем 22 патентов и автором более 20 опубликованных статей. Также он по совместительству преподает в Университете Райса, где ведет курсы конструирования встроенных аналоговых и цифровых систем. В 1984 году Чан получил степень бакалавра точных наук и электротехники (BSEE – Bachelor of Science, Electrical Engineering) в университете Иллинойса в г. Урбан-Шампейн, штат Иллинойс. Степени магистра и доктора философии по электротехнике он получил в университете Хьюстона, г. Хьюстон, Техас в 1995 и 2001 годах соответственно.

# ГЛАВА I

## ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦОС

В связи с постоянным увеличением (причем с высокой скоростью) производительности систем ЦОС и их тактовых частот особое значение приобретает борьба с шумом и паразитным излучением, а также потребляемая мощность. При работе на высоких частотах дорожки печатных плат как проводники сигналов выступают в качестве линий передачи и антенн<sup>1</sup>, которые могут генерировать и переизлучать сигналы, что вызывает искажения и создает проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Это зачастую создает трудности для выполнения требований класса А и В [1], предъявляемых Федеральной комиссией по связи (США). Проблемы ЭМС могут усугубляться из-за необходимости теплоотвода и охлаждения для решения температурных проблем в проектах высокой значимости. Многие современные системы имеют встроенные беспроводные интерфейсы для локальных вычислительных сетей (ЛВС) и систем Bluetooth, что создает дополнительные трудности конструирования, обусловленные необходимостью установки радиаторов.

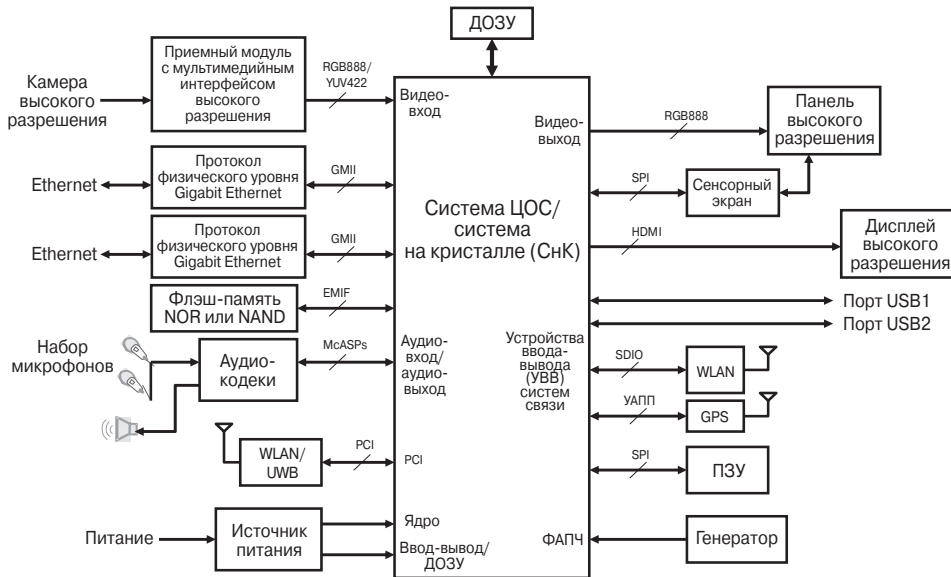
В связи с упомянутыми трудностями традиционный процесс проектирования быстродействующих систем ЦОС подлежит переосмыслению. При традиционном подходе инженеры сосредоточены на аспектах функциональности и быстродействия разрабатываемых устройств. Шум и излучение как таковые рассматриваются только на более поздних этапах процесса проектирования, причем только в случае обнаружения проблем при тестировании прототипа. Однако в настоящее время проблема шума становится все более актуальной, так как более 70% новых конструкций не проходят первичный тест по ЭМС. Таким образом, эти вопросы необходимо начинать решать уже на первом этапе процесса проектирования. Потратив небольшое время на использование методов проектирования, обеспечивающих более низкие уровни шумов и излучения на начальном цикле разработки, мы сделаем проект гораздо более рентабельным за счет минимизации издержек на завершающих этапах при переработке проекта и предотвращения задержек поставок продукции.

---

<sup>1</sup> В отечественной литературе термин «антенна» в большей степени относится к специализированному устройству, предназначенному для излучения или приема электромагнитных волн. В этой книге автор называет антеннами любые излучатели и приемные устройства электромагнитной энергии, которые ответственны за паразитные излучения от участков печатной платы и других проводников. — *Примеч. ред.*

## 1.1. Обзор высокоскоростных систем ЦОС

Типичные системы ЦОС, как например система, показанная на рис. 1.1, состоят из большого числа внешних устройств: звукового кодека, видео, жидкокристаллического (ЖК) дисплея, модуля беспроводной связи (типа, например, Bluetooth, GPS, UWB и IEEE 802.11), контроллера Ethernet, USB, источника питания, генераторов, запоминающих устройств, ОЗУ и вспомогательных цепей. Каждый из этих компонентов может быть источником шума, или подвергаться воздействию помех, создаваемых соседними компонентами. Следовательно, для минимизации шумов компонент и системы в целом и, соответственно, для удачной реализации проектного решения необходимо, чтобы разработчик имел хороший опыт проектирования быстродействующих систем.



GMII – гигабитный интерфейс, независимый от среды передачи данных  
 EMIF – интерфейс с внешней памятью  
 WLAN/UWB – беспроводная ЛВС/сверхширокополосная связь  
 McASPs – последовательные порты многоканальной аудиосистемы  
 PCI – локальная шина соединения периферийных устройств  
 ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты  
 SPI – последовательный интерфейс  
 SDIO – безопасные цифровые каналы ввода-вывода  
 УАПП – универсальный асинхронный приемопередатчик  
 GPS – модуль глобальной системы позиционирования

Рис. 1.1. Типичная система ЦОС

Связь между источником шума и его «жертвой» вызывает электрический шум. Рис. 1.2 показывает типичный путь распространения шумов. Источником шума, как правило, является быстро коммутируемый сигнал, а объектом воздействия шума – компонент, несущий сигнал. Шум будет влиять на рабочую характеристику компоненты, подверженной воздействию шума. Связь обеспечивается через паразитные емкости и взаимные индуктивности соседних сигнальных це-

пей. Электромагнитное взаимодействие возникает, когда сигнальные тракты выступают в роли эффективных антенн, излучения которых создают помехи смежным цепям.



Рис. 1.2. Типичный путь прохождения шума

В электронной системе существует много механизмов генерации шума. Внешние и внутренние цепи синхронизации систем ЦОС, как правило, имеют очень высокие частоты переключения, являясь главным источником высокочастотных помех. Из-за неправильного согласования<sup>1</sup> и подключения сигнальных шин могут возникать отражения и искажения сигнала. Помимо этого, в результате неправильной маршрутизации сигнала, заземления и развязки источника питания могут возникать существенные фоновые помехи, перекрестные помехи и паразитные колебания. Шумы могут также возникать и в самих полупроводниках [2].

- **Тепловой шум.** Известен также как шум Джонсона, присутствует во всех резисторах и обусловлен хаотичным тепловым движением электронов. При проектировании аудио- и видеосистем тепловой шум может быть минимизирован за счет обеспечения максимально низкого сопротивления соответствующих резисторов, что необходимо для улучшения отношения сигнал – шум (ОСШ).
- **Дробовой шум.** Обусловлен хаотическим прохождением зарядов через вентили диодов и транзисторов. Этот шум обратно пропорционален величине постоянного тока, текущего через диод или транзистор, в связи с чем более высокое значение отношения сигнал – шум соответствует более высоким значениям постоянного рабочего тока. Дробовой шум может играть большую роль, когда система ЦОС включает сигнальные тракты с большим числом аналоговых дискретных устройств, например видео- или аудиоусилители.
- **Фликкер-шум.** Также известен как  $1/f$  шум, наблюдается во всех активных элементах. Он обусловлен ловушками, когда преграды для заряда хаотически захватывают и высвобождают заряды, вызывая случайные флуктуации тока. Поскольку фликкер-шум сопутствует любому процессу полупроводниковой технологии, методы проектирования систем ЦОС не располагают возможностями полного его устранения и должны фокусироваться на снижении его воздействия.

<sup>1</sup> Автор использует здесь термин «согласование» в более широком смысле, чем это принято в отечественной технической литературе. В России под этим обычно понимается согласование комплексных импедансов по входу и выходу. Автор называет согласованием и выбор правильной нагрузки линий передачи. — *Примеч. ред.*

- **Импульсный и лавинный шум.** Импульсный шум также известен как «попкорн»-шум, и он вызван наличием ионных примесей. Лавинный шум наблюдается в режиме пробоя. Следует еще раз отметить, что эти типы шума связаны с технологией процесса обработки полупроводников, а не с методами проектирования систем. Так как мощность излучаемой в пространство электромагнитной энергии регламентируется, разработчики систем ЦОС должны быть озабочены потенциальной возможностью излучения помех в окружающее пространство. Главными источниками излучения являются цифровые сигналы, проходящие по соответствующим трактам, наличие областей контуров обратного тока, недостаточная фильтрация или развязка источника питания, воздействие со стороны линий передачи и отсутствие возвратных и заземляющих слоев печатной платы. Важно отметить, что на гигагерцевых частотах теплоотводы и конструктивные резонансы могут усиливать излучение.

Несмотря на невозможность полного устранения шума в системах ЦОС, он может быть уменьшен до такой степени, чтобы не оказывать существенного влияния на другие цепи системы. Существует три способа борьбы с шумом: его подавление в самом источнике, обеспечение нечувствительности к нему соседних цепей и устранение паразитной связи каналов. Методы проектирования быстродействующих систем могут быть использованы для уменьшения как шума компонентов, так и системного шума, что повышает вероятность удачного проектного решения. В этой книге рассматриваются все три перечисленных метода борьбы путем выработки рекомендаций, которые могут использоваться на самом начальном этапе процесса проектирования для снижения шума и излучения до приемлемых уровней в процессе поиска и устранения неисправностей. Примеры чувствительных к помехам интерфейсов, показанные ниже, ориентированы на аудио- и видеосистемы, устройства памяти и источники питания. Рабочие характеристики этих систем очень сильно зависят от окружающих цепей ЦОС, а также от того, каким образом эти цепи связаны со схемой ЦОС.

## 1.2. Проблемы систем цифровой обработки аудиосигнала

Одной из наиболее значимых проблем ЦОС при проектировании быстродействующих аудиосистем является то, что относительно небольшие уровни шума в них зачастую заметно влияют на рабочие характеристики конечного устройства. При осуществлении звукозаписи и ее воспроизведении качество звучания зависит от качества используемого аудиокодека, шума источника питания, компоновки аудиоплаты и уровня перекрестных помех между соседними цепями. Кроме того, во избежание нежелательных звуковых потрескиваний и пощелкиваний при звукозаписи и воспроизведении должна быть обеспечена очень хорошая стабильность частоты дискретизации. На рис. 1.3 показана типичная сигнальная цепь системы ЦОС для аудиотракта. В большинстве систем ЦОС для интерфейса с внешними аудиокодеками используется многоканальный последовательный порт с

буферизацией данных (McBSP [3]). Несмотря на то, что данный интерфейс является специализированным, он легко конфигурируется для работы с аудиокодеками промышленного стандарта I<sup>2</sup>S.

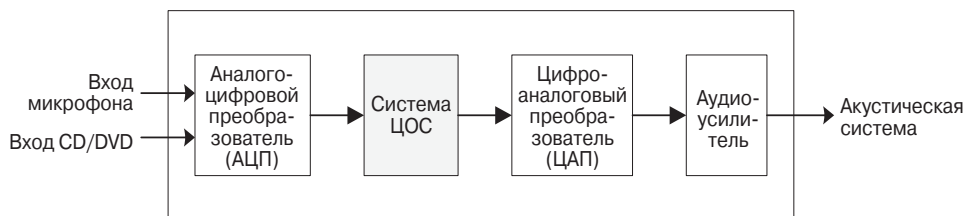


Рис. 1.3. Аудио система ЦОС

Так как все показанные на рис. 1.3 блоки в направлении от АЦП к усилительному каскаду очень чувствительны к помехам, то распространение любой помехи, связанной с любым из блоков, приведет к нежелательным звуковым эффектам. Типичными при проектировании аудиосистем являются проблемы из-за:

- шума, связанного с микрофонным входом. Так как вход микрофона, как правило, характеризуется очень высокой чувствительностью (+20 дБ), то даже небольшой уровень шума может привести к появлению акустических эффектов;
- отсутствия на аудиовходах фильтрации от наложения спектров;
- чрезмерного искажения, обусловленного каскадом усиления и амплитудным рассогласованием;
- чрезмерного джиттера (неустойчивости) звуковых синхроимпульсов, разрядных синхронизирующих и главных тактовых импульсов;
- отсутствия хорошей развязки и шумовой изоляции;
- отсутствия стабилизации напряжения источника питания с высокой режекцией помех, создаваемых аудиокодеком;
- отсутствия хороших развязывающих конденсаторов по опорному напряжению, используемых для АЦП и ЦАП;
- шума переключения импульсного источника питания, связанного с аудиоцепями;
- размещения аудиотрактов с высоким импедансом в непосредственной близости от шумящих переключающих схем и отсутствия в разводке печатной платы кратчайшего пути для обратного тока с целью минимизации обратной связи по току между системой ЦОС и кодеком;
- отсутствия изолированного заземления для аналоговых и цифровых цепей.

В конечном счете для звука хорошего качества необходимо правильное проектирование всех АЦП, ЦАП, интерфейсов систем ЦОС, тактовых генераторов, входных/выходных фильтров, источников питания и схем выходных усилителей. Рабочие характеристики всех этих устройств зависят не только от качества проектирования цепей, но также от развязки по земле и питанию, а также от маршрутизации дорожек печатной платы.



### 1.3. Проблемы систем цифровой обработки видеосигнала

Обработка видеoinформации является другой важной областью применения систем ЦОС, которые очень чувствительны к помехам и излучению. Одна из главных проблем проектирования видеосистем состоит в необходимости обеспечения устранения таких недостатков видеоизображения, как искажение цвета, фоновый шум сетевой частоты, видимые высокочастотные помехи, обусловленных работой быстродействующих шин, биением звука и т.д. Все они обычно связаны с неправильным проектированием видеоплаты и с неправильной ее разводкой. Например, помехи от источника питания могут попасть на видеовыход ЦАП, звуковоспроизведение может привести к возникновению переходных процессов в источнике питания, а высокочастотное излучение может навести в тюнере помехи по цепям обратной связи. Ниже приведены характерные проблемы, связанные с помехами по видеосигналу:

- нарушение целостности сигнала, наличие резких перепадов (вверх и вниз) по цепям горизонтальной и вертикальной синхронизации, частоты пикселизации, вызванные неправильным подключением сигнальной нагрузки;
- чрезмерный уровень излучения от таких быстродействующих шин, как PCI, параллельных видеопортов (BT.1120, BT.656) и устройств DDR;
- сильный джиттер в кодере, декодере и в каскадах тактовой частоты пикселизации вызывает проблемы детектирования цветовой информации, например формирование только черно-белого изображения на цветном экране;
- недостаточное сопротивление нагрузки видеосистемы вызывает искажение видеоизображения. На входе видеodeкодера и на выходе видеodeкодера должен использоваться 75-омный согласующий резистор;
- воспроизведение звука может привести к мерцанию видеоизображения на экране. Это может быть исправлено за счет дополнительного экранирования видео- и аудиоцепей. Наилучшим методом является использование линейных стабилизаторов, обеспечивающих подавление пульсаций источников питания высокой мощности аудиокодека и видеodeкодера/декодера. Кроме того, для уменьшения перекрестных и других помех можно вручную трассировать критические цепи с любыми коммутируемыми сигналами;
- изолированное заземление для аналоговых сигналов без специализированной цепи возврата сигнала. Важно помнить, что для низкоскоростного сигнала, то есть на частоте ниже 10 МГц, ток возвращается через наименьшее сопротивление, что, как правило, соответствует самому короткому пути. С другой стороны, высокоскоростной ток возвращается через наименьшую индуктивность, обычно под сигнальной дорожкой.

На рис. 1.4 показана типичная цифровая видеосистема высокого разрешения, обеспечивающая захват, обработку и затем воспроизведение изображения на основе аналоговых и цифровых видеосигналов высокого и стандартного разрешения. Качество «картинки» дисплея определяется качеством тракта прохождения этого видеосигнала, что в особенности касается входных и выходных видеокаскадов.