

Модуль приемника SPDIF сигналов

Распространенная повседневная привычка слушать музыку с компьютера обусловила к нынешнему времени широкую популярность USB как основного входа ЦАП. На данный момент существует достаточное количество хорошо зарекомендовавших себя USB решений, позволяющих реализовать бескомпромиссное качество звука ЦАП. Тем не менее, стандартом для цифровой передачи звука на данный момент де-факто остается SPDIF. Как следствие, ЦАП без такого входа остается "нишевым" устройством. Известные мне варианты реализации SPDIF интерфейсов по тем или иным причинам не подходили мне в качестве базового модуля для ЦАП. Это побудило собрать свой вариант устройства.

Микросхема преобразователя	WM8804
Входы	
1. Несимметричный	RCA (75 Ом)
2. Симметричный	XLR (110 Ом)
3. Оптический	TOSLINK
4. Внутренний I ² S	совместим с модулями Болеро, Edel
Выходы	
1. Несимметричный	RCA (75 Ом)
2. Оптический	TOSLINK
Поддерживаемые частоты дискретизации (Fs)	32, 44.1, 48, 88.2, 96, 176.4, 192 кГц
Режимы работы	
1. Стандартный	(Восстановление мастерклока из SPDIF потока)
2. С обратной синхронизацией	(MACTER режим)
Выходной формат	I ² S, 24 Бит (незначащие разряды обнуляются)
Частота сигнала мастерклока	22.5792 / 24.576 МГц
Сигналы для управления ЦАП	MUTE;
переключение цифрового фильтра	диапазон Fs – 44.1/48, 88.2/96 или 176.4/192 кГц
выбор режима тактирования ЦАП	ведомый / МАСТЕР режим
выбор мастер-генератора ЦАП	сетка частот - x44.1 или x48 кГц
Светодиодная индикация	
1. Выбранный вход	USB (I ² S), XLR, RCA, TOSLINK
2. Нормальный режим/MUTE	зеленый/красный светодиод
3. Активный SPDIF выход / МАСТЕР-режим	зеленый/красный светодиод
4. Частота дискретизации входного потока	44.1, 48, 88.2, 96, 176.4, 192 кГц
Управление	
1. Кнопка селектора входов (циклический перебор)	
2. а) Кнопка включения выхода (короткие нажатия), б) активации МАСТЕР-режима (длительное нажатие) и в) принудительного выбора Fs в МАСТЕР-режиме (циклический перебор короткими нажатиями)	

Гальваническая и ВЧ развязка SPDIF входов/выходов

* Модуль рассчитан на прием сигналов формата SPDIF (IEC 60958-3, consumer mode). Сигналы AES/EBU (IEC 60958-4, professional mode) в типичном случае нормально воспроизводятся устройством, но не исключена некорректная работа в некоторых режимах. Кроме того, с AES/EBU сигналами не работает автоматическое определение частоты потока в МАСТЕР-режиме (следует использовать принудительный выбор частоты дискретизации).

** Работа в МАСТЕР-режиме требует дополнительного соединения с источником SPDIF программ. Этот источник, в свою очередь, должен допускать возможность синхронизации от внешнего SPDIF.

Конструктивно модуль выполнен на двух платах: основной и платы индикации/управления.

По короткой стороне основной платы (120 x 100 мм) расположены входные SPDIF разъемы TOSLINK (U1, U2), RCA (J1, J2) и XLR (JP1). На противоположной стороне – входные разъемы для модулей Болеро и Эдель (J9, J10 и J11, соответственно), колодки питания, программирования МК и выход на плату индикации (J5, J6 и J8, соответственно). На боковой стороне – выходной разъем (J4), он имеет такую же распиновку, как и в USB-модуле Эдель. Кроме того, на плате расположен джампер выбора одного из двух I²S входов для подключения USB-модулей – Эдель, либо Болеро (J7).

На плате управления и коммутации (75 x 75 мм) расположены два ряда светодиодов и кнопки управления.

Основой модуля является микросхема WM8804 под управлением микроконтроллера. Сигналы мастерклока и сигнальных линий коммутируются отдельными логическими элементами (LVCMOS125/6, AC245) – такие дискретные буферы можно расположить в наиболее подходящем месте платы (оптимизация волнового сопротивления линий, минимизация взаимовлияния, отражений, компактная трассировка и т.п.). SPDIF входы подключены через отдельные буферы (RS485-трансиверы 75LBC176). На этом фоне несколько дополнительных корпусов делителя клок для мастер-режима уже не выглядят чрезмерно громоздко.

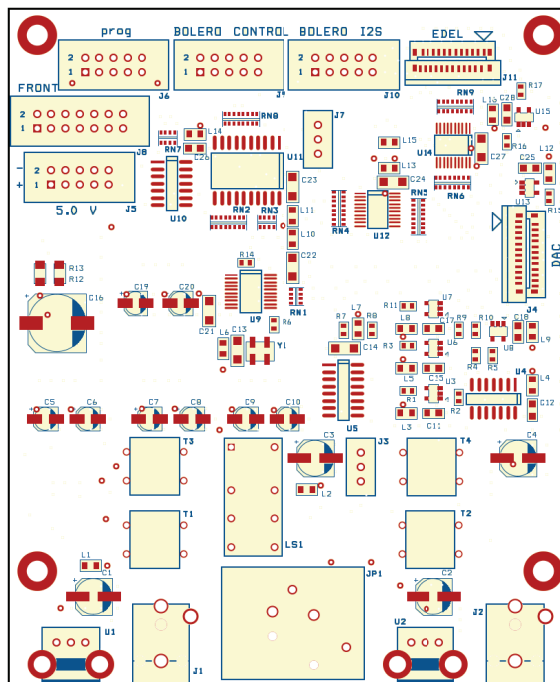
Устройство питается от стабилизированного источника +5 Вольт. На плате предусмотрены отдельные стабилизаторы +3.3 Вольт (LM1117):

- для некритичных цепей (МК, периферийные цепи WM8804, сигнальные цепи);
- питание PLL-ядра WM8804;
- питание кварцевого генератора (C3391-12.000, Crystek) и цепей мастерклока;
- питание оптических приемников и передатчиков TOSLINK.

Основная идея разделения питания – минимизировать влияние наиболее "шумных" цепей (МК, SPDIF приемники/передатчики) на критичные цепи мастерклока и PLL. Этой же цели служит четырехслойная печатная плата с максимальной заливкой "землей" и обширными полигонами питания. Кроме того, нежелание пускать значительные токи входного/выходного SPDIF сигналов через WM8804 (где они могут оказывать нежелательное влияние на чувствительные цепи PLL и мастерклока) побудило использовать отдельные драйверы для SPDIF входов и выхода.

Входные и выходные SPDIF сигналы гальванически развязаны посредством сигнальных трансформаторов (Муратовские DA101C). Поскольку межобмоточная емкость ограничивает эффективность трансформаторной развязки относительно низкими частотами, еще одна пара трансформаторов (включенных синфазными дросселями) используется для эффективной развязки на высоких частотах. Переключение между симметричным (XLR) и несимметричным (RCA) входами осуществляется посредством реле. Для уменьшения паразитной емкостной связи на плате отсутствуют заливка медью в области входных дорожек.

WM8804 управляется микроконтроллером (Attiny 2313). Основную часть времени микроконтроллер "спит", запускаясь только на время смены режимов WM8804. Алгоритм работы несколько отличается от даташитного и выглядит следующим образом:



- a) При любом изменении типа входного сигнала выставляется сигнал MUTE, а WM8804 ресетится;
- b) в WM8804 записываются коэффициенты PLL, оптимальные для захвата.
- c) После удачного захвата сигнала из WM8804 считывается *детектированное* значение диапазона частоты дискретизации (44.1/48, 88.2/96 или 176.4/192 кГц) после чего
- d) в WM8804 записываются коэффициенты PLL, оптимальные для минимизации джиттера,
- e) делитель мастерклока устанавливается в состояние, соответствующее 22.5792 / 24.576 МГц,
- f) обновляется индикация актуальной частоты дискретизации, и устанавливаются сигналы управления ЦФ,
- g) после подтверждения бесперебойного приема сигнала снимается управляющий сигнал MUTE.

К сожалению, система восстановления мастерклока WM8804 порой ведет себя забавным образом в переходных режимах, выдавая вместо мастерклока нечто странное. Это особенность не составляет проблемы, когда сигнал MUTE непосредственно отключает выходы ЦАП, но если в ЦАП глушится только микросхема-преобразователь, на его выходе могут быть слышны неприятные артефакты. Вероятно, эту особенность WM8804 можно обойти применением опорного генератора с частотой, близкой к выбранной частоте выходного мастерклока, в данном случае ~24 МГц. При использовании же генератора на 12 МГц проще не пропускать сигнал восстановленного мастерклока на выход модуля на время переходных режимов, а сам ЦАП уводить не только в MUTE, но и в "ресет". Это позволяет избавиться от каких-либо артефактов при срывах входного SPDIF потока, например, при коммутации входов или смене частоты дискретизации.

При включении МАСТЕР-режима у WM8804 дополнительно к приемнику активируется еще и передатчик. Он транслирует "тишину", все что требуется от передаваемого сигнала – частота следования SPDIF пакетов должна быть жестко задана генераторами ЦАП.

Для нормальной работы WM8804, его PLL должна быть активна, поэтому кварцевый генератор модуля не отключается в этом режиме, но все внешние сигналы тактируются сигналом мастерклока, поступающим с генераторов, установленных в ЦАП (должен быть активирован генератор, соответствующий актуальной частотной сетке). Этот сигнал делится простейшими триггерами и счетчиком (AC74 + HC590) и подается на выводы бит-, ворд- и мастерклока у WM8804 (эти выводы становятся входами).

В итоге оказывается, что одни и те же клоки тактируют как сам ЦАП, так и передатчик, и приемник WM8804, чем и достигается "безджиттерный" режим работы.

Некоторую сложность представляет собой то обстоятельство, что при использовании "обратной синхронизации" источник SPDIF (например, звуковая карта) отдает поток с частотой, которую получает в качестве опорной. А получает он ту частоту, которую "придет в голову" посылать приемнику (WM8804). То есть приемник заранее должен знать какую именно частоту дискретизации нужно выбрать.

В идеальном случае SPDIF сигнал несет в себе помимо звуковой, еще и дополнительную информацию о сигнале: разрядность звукового потока, сведения о копирайте и т.п., но что особенно важно – информацию о "должной" частоте дискретизации. Этот код можно прочитать в регистрах WM8804 и использовать для выбора нужной опорной частоты. Ввиду этого алгоритм автоопределения частоты в МАСТЕР-режиме выглядит следующим образом:

- a) При любом изменении типа входного сигнала выставляется MUTE и сбрасывается WM8804.
- b) WM8804 конфигурируется и запускается на частоте, которую гарантированно должен поддерживать источник, например 44.1 или 48 кГц.
- c) В случае "захвата" сигнала из WM8804 считывается "должное" значение частоты дискретизации.
- d) Делитель частоты мастерклока устанавливается в соответствующее состояние, обновляется индикация актуальной частоты дискретизации и устанавливаются сигналы управления ЦФ.
- e) WM8804 сбрасывается и конфигурируется в нужном режиме.
- f) после подтверждения бесперебойного приема сигнала снимается управляющий сигнал MUTE.

К сожалению, в реальности ситуация с передачей кодов частоты дискретизации вместе с сигналом SPDIF далеко не так хороша, как предусмотрено действующими стандартами. Часть источников в

согласии с древними версиями стандарта передают только коды для $F_s = 32, 44.1$ и 48 кГц, часть вообще не передает ничего (это часто интерпретируется как $F_s = 44.1$ кГц); некоторые источники почему-то обновляют эту информацию не сразу и т.д. т.п. Кроме того, источники, которые работают не в потребительском формате SPDIF, а в профессиональном AES/EBU вообще имеют иной формат записи этого кода, который просто игнорируется WM8804. В этой ситуации остается только принудительно выбирать нужную частоту дискретизации, что в общем-то обычно не создает особых проблем.

Стоит упомянуть, что отключение SPDIF линии обратной синхронизации некоторое время ничего не меняет в воспроизведении сигнала. Из-за неизбежного рассогласования частот генераторов в источнике и в ЦАП SPDIF блоки будут посылаться быстрее/медленнее, чем они "принимаются". Рано или поздно это приведет к переполнению/опустошению внутреннего буфера WM8804. Нужно отметить, что в WM8804 корректно реализована отработка подобных событий, в поток вставляется интерполированный семпл (или семпл выпадает), что приводит к щелчку. Заранее предсказать степень рассогласования блоков передатчика и приемников нельзя. "Щелкать" может как раз в минуту, так и раз в несколько секунд, но очень тихо и на практике необнаружимо на типичной фонограмме. Правда это вполне заметно на средне-высокочастотных чистых тонах и порой (если очень повезет) на вокальных партиях при повышенной громкости. Тут важно, что "между потрескиваниями" воспроизведение остается "безджиттерным", в значительной степени сохраняя звуковые особенности МАСТЕР-режима даже без петли обратной синхронизации.

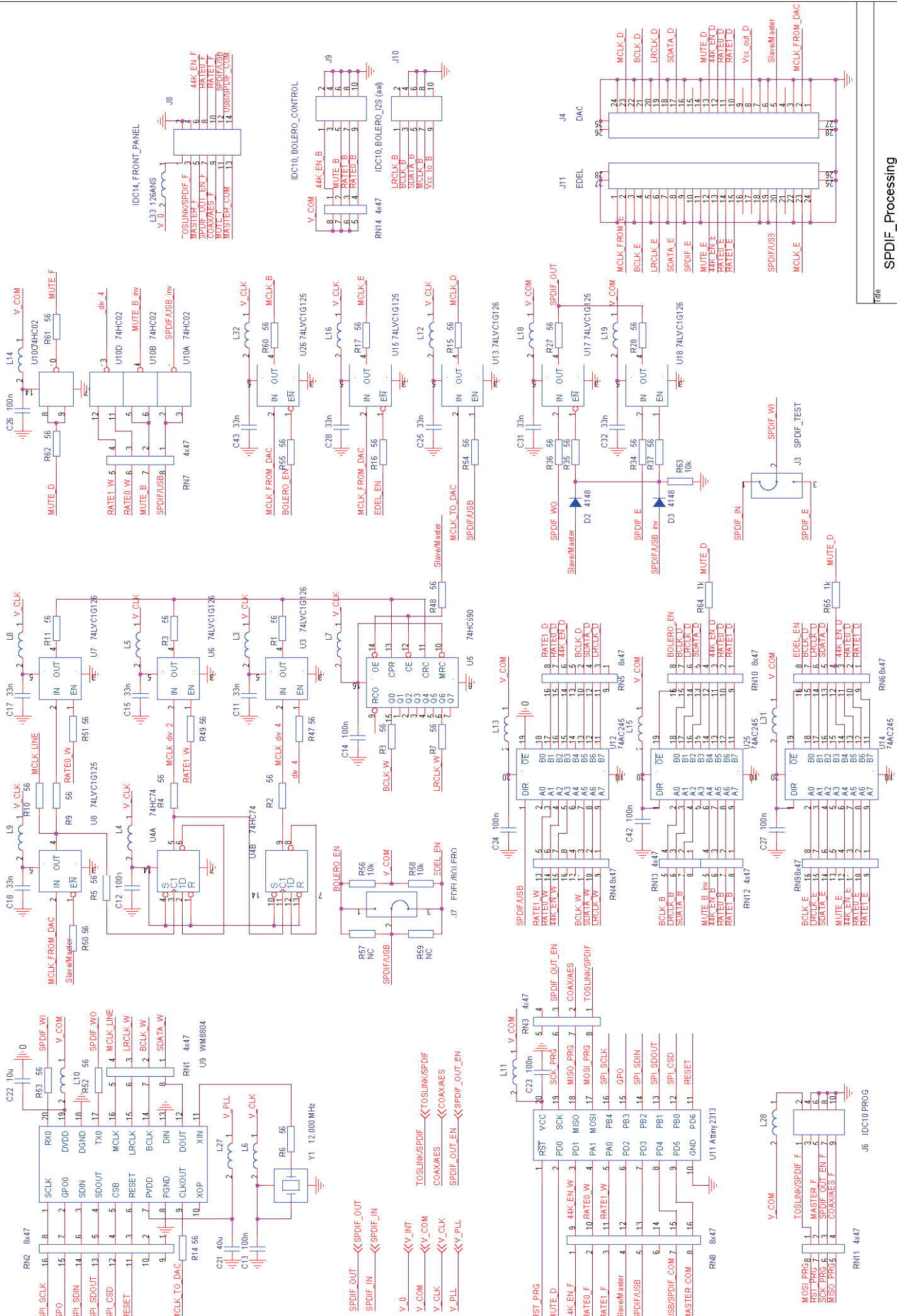
Дополнительной ценностью такого "псевдоМАСТЕР"-режима является возможность при удачном стечении обстоятельств сравнить звучание восстановленного (в стандартном режиме) мастерклока с "идеальным". После чего, уже на основании собственного опыта, можно сделать вывод об актуальности организации обратной петли синхронизации или иных альтернативных способов дополнительного подавления джиттера. Единственное ограничение на применение "псевдоМАСТЕР"-режима – источник сигнала должен быть достаточно качественным, например, большинство SPDIF выходов на материнских платах имеют неприемлемо большие колебания частоты.

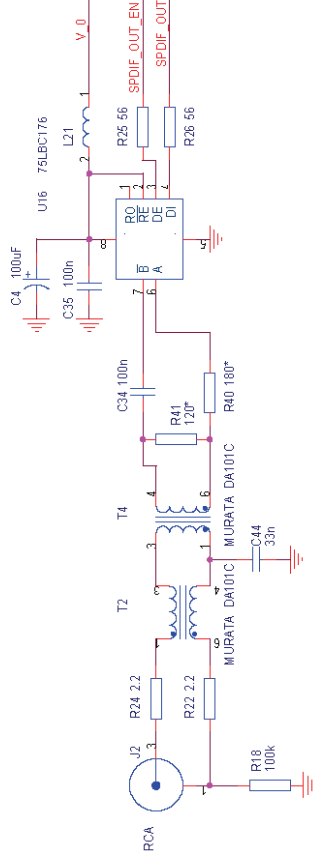
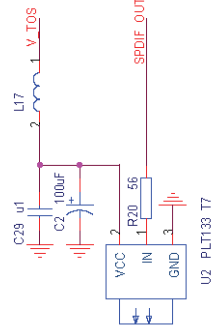
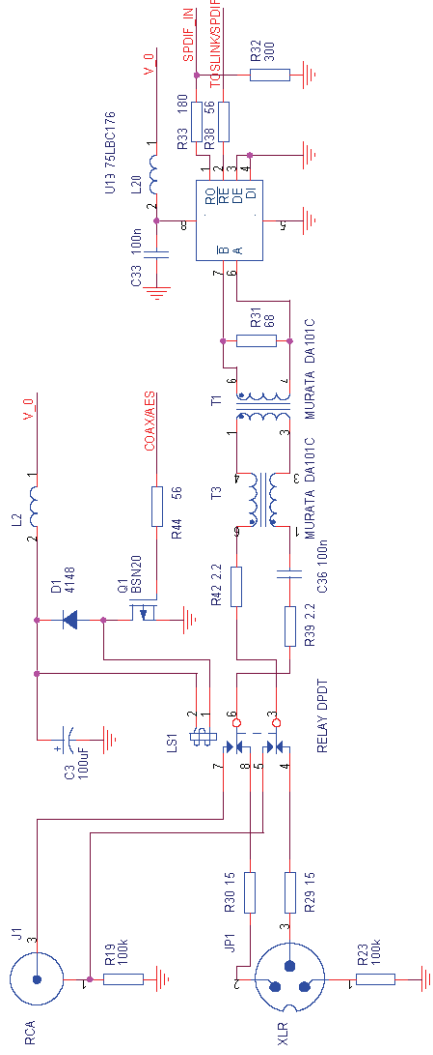
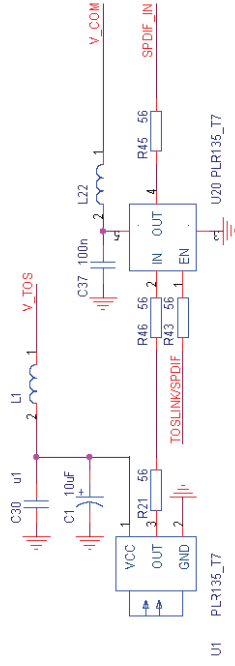
Логика управления модулем довольно прямолинейна. Одна из кнопок ("Выбор режима") посредством циклического перебора позволяет выбирать один из источников.

Вторая кнопка ("Активация SPDIF выходов / включение МАСТЕР-режима / выбор частоты дискретизации в МАСТЕР-режиме") имеет несколько режимов работы. В обычном режиме ее короткие нажатия включают/выключают SPDIF выход, что сопровождается зеленым свечением светодиода. SPDIF сигнала берется с USB-модуля (Эдель). То есть независимо от того, какой из входов активен в данный момент, на SPDIF выходы будет передаваться сигнал с USB-входа. Это, кстати, позволяет соединить SPDIF выходы с соответствующими входами, тогда перебирая селектором входы, можно в довольно корректных условиях оценить качество работы модуля при проводном и/или оптическом соединении в сравнении с "идеально-безджиттерным" USB мастер-режимом.

Длительное нажатие второй кнопки включает/выключает МАСТЕР-режим (предварительно активируя SPDIF выход). При этом индикаторный светодиод меняет цвет на красный. После нескольких перемигиваний загорается светодиод, индицирующий опознанную частоту дискретизации. Если в силу особенностей источника частота не была опознана (светодиод "Активный режим/MUTE" не сменил цвет свечения с красного на зеленый), стоит попробовать короткими нажатиями второй кнопки выбрать нужную частоту дискретизации самостоятельно. Перебор частоты идет циклически, причем следующее после позиции "192 кГц" нажатие кнопки включит не 44.1 кГц, а (потушив все светодиоды индикации частоты), снова включит режим автоопределения частоты дискретизации. Если при этом не нажимать кнопку еще раз (устанавливая частоту 44.1 кГц), то модуль будет снова пытаться опознать актуальную частоту.

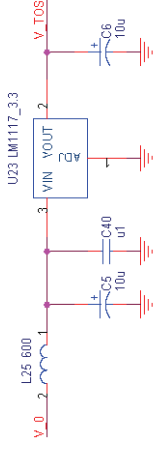
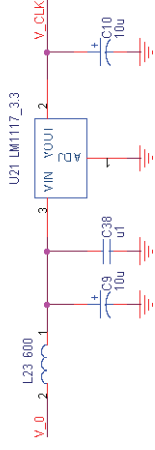
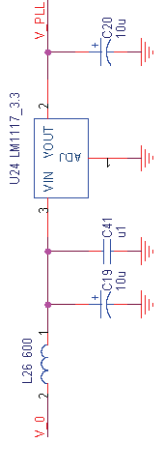
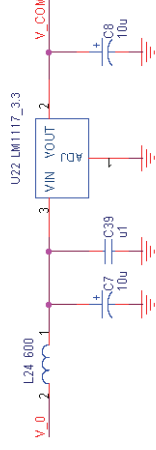
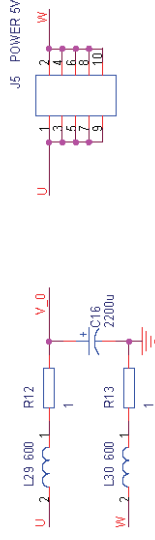
Ниже приведена принципиальная схема основной платы устройства:





SPDIF_IN SPDIF_OUT
TOSLINK/SPDIF COAX/AES
SPDIF_OUT_EN SPDIF_OUT_EN

V_COM V_COM
V_PLL V_PLL
V_CLK V_CLK





Модуль SPDIF с платой управления в составе отладочного макета универсального ЦАП.

Результаты субъективной оценки не могут носить универсального характера. Особо хотелось бы отметить следующие обстоятельства:

- а) Микросхемы-преобразователи ЦАП по-разному реагируют на джиттер мастерклока, и распространять опыт с AD1955 на другие ЦАП, особенно на параллельные приборы (естественно с реклоком) неправомерно.
- б) Все использовавшиеся источники SPDIF тактируются от кварцевых генераторов и достаточно хороши в смысле изначально низкого джиттера выдаваемого потока.
- в) Далеко не всегда могут быть обеспечены условия для корректного сравнения. Так, например, попытка использовать выход материнской платы (TOSLINK) провалилась, поскольку штатными средствами windows 7 так и не удалось добиться корректного вывода содержимого звуковых файлов.

Главное наблюдение сводится к тому, что джиттер восстановленного мастерклока в данном сетепе далеко не всегда является фактором, критичным для субъективного качества звучания. Нужно отметить, что субъективно воспринимаемое качество звука в разных режимах отличается мало, на уровне эффектов самовнушения, потому сделанные оценки не могут быть однозначны даже для автора.

Наивысшим качеством звучания обладает USB-подключение. Практически так-же хорошо звучит проводное SPDIF подключение независимо от вида – коаксиал/витая пара (RCA/XLR). Забавно, что характер звука одинаков в случае стандартного подключения, в МАСТЕР и "псевдоМАСТЕР"-режимах.

Практически не уступает и TOSLINK-подключение в режимах МАСТЕР и "псевдоМАСТЕР". В стандартном включении "оптика" звучит едва заметно хуже (заметно при прослушивании на большом уровне громкости), но без сравнения с другими источниками я бы никогда не взялся определять, какой из входов подключен в данный момент. Кроме того, можно заметить, что качество TOSLINK соединений весьма нестабильно. При том, что в идеальных условиях все работает замечательно, очень легко перешагнуть порог, после которого качество резко падает. Влияет практически все: качество и длина кабеля, плотность посадки в разъемах и т.п., не говоря уже о том, что источники, которые реально могут „тянуть“ поток 176/192 кГц – это скорее экзотика.

При этом проводное подключение показывает исключительную надежность. Практически не удалось обнаружить влияния вида и качества кабеля на надежность подключения. При длине до метра-двух отлично работают как BNC-кабели с волновым сопротивлением 50 Ом (стандарт предписывает 75 Омные кабели), так и "нонеймовские" RCA-шнуры и даже просто свитые провода.

Основной вывод входит в некоторое противоречие с предыдущим опытом. Несмотря на устоявшиеся представления, SPDIF подключение с восстановленным мастерклоком вполне способно субъективно конкурировать с тактированием источника от генераторов ЦАП (SPDIF с обратной синхронизацией, асинхронный USB).

Объяснить такое поведение можно несколькими способами:

- a) Величина джиттера мастерклока восстановленного посредством WM8804 в примененных ЦАП оказывается ниже субъективно заметного порога;
- b) Квалификация слушателя не позволяет заметить те или иные артефакты;
- c) Использувавшиеся для прослушивания устройства не обладают достаточным разрешением.

Не исключено, что часто наблюдаемое субъективно более низкое качество звучания с SPDIF в типовом случае имеет причиной не только избыточный джиттер мастерклока (в этом смысле WM8804, с его довольно неплохими характеристиками, расположен несколько особняком), но и в значительной степени сопутствующие факторы – паразитные земляные петли при недостаточной развязке, повышенный уровень помех и т.п. По крайней мере, при отладке данного модуля наблюдалось заметное ухудшение качества при попытках пренебречь, например, ВЧ-развязкой SPDIF-входов, отдельным питанием PLL, режимом сна процессора и т.п.

В этом смысле, напрашивается вывод, что внимательное отношение к "мелочам" реализации способно поставить под вопрос пресловутую "принципиальную ущербность" формата SPDIF.

Виктор Корсаков (ViktKors)

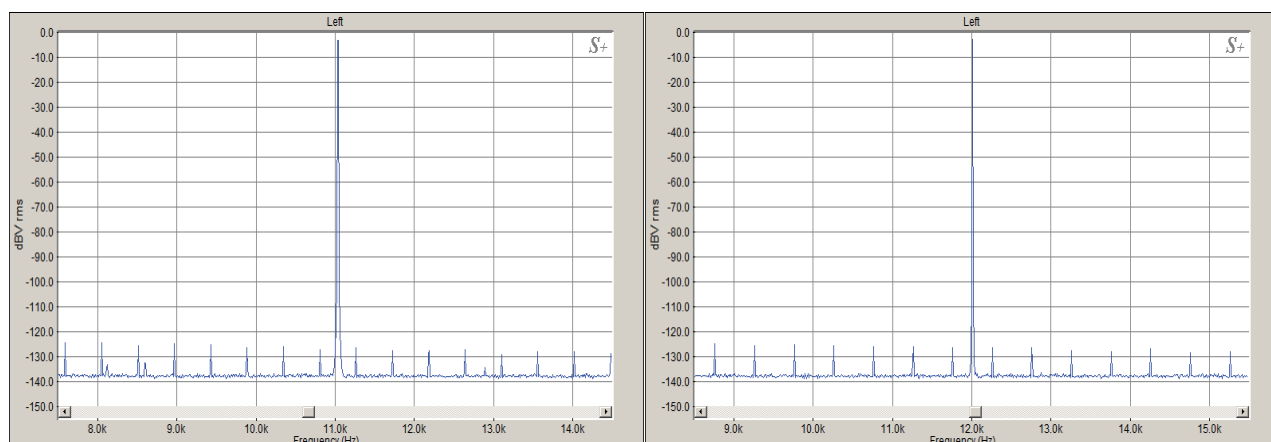
апрель, сентябрь 2014.

Ниже приведены некоторые результаты измерений данного модуля совместно с макетом "балансного" ЦАП на AD1955 в моно-включении. Для сравнения приведен режим асинхронного USB (генераторы Crystek CCHD957). Результаты измерения в МАСТЕР-режиме (SPDIF с обратной синхронизацией) не показаны, но они практически неотличимы от USB, что неудивительно, учитывая, что тактирование ЦАП в этих режимах идентично.

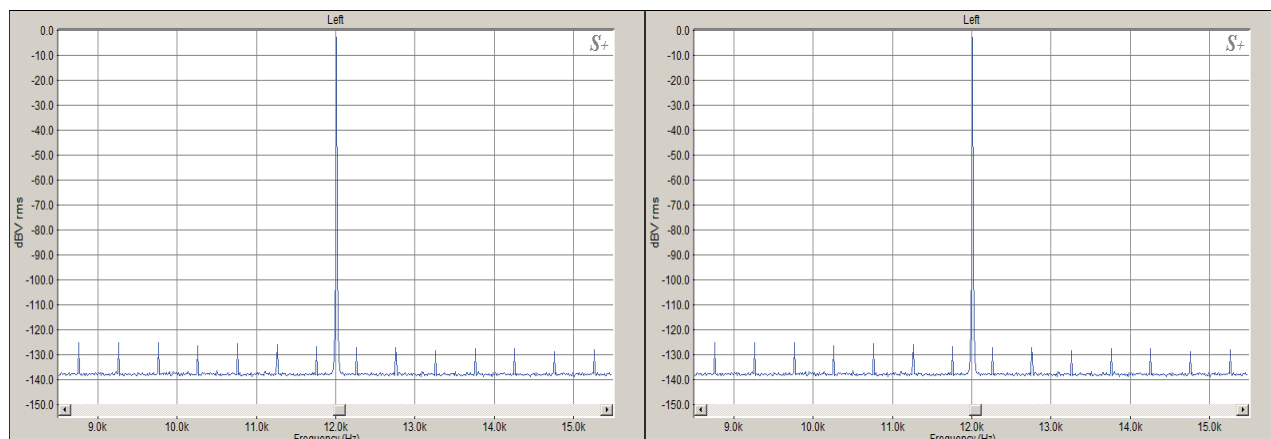
1. "J-TEST". Распространенный тест на подверженность приемника джиттеру данных.

Амплитуда основного тона -3 дБ, частота $F_s/4$, модуляция LSB с частотой $F_s/192$, Разрядность 16 бит. Воспроизведение тестового сигнала через коаксиальный вход ("оптика" выглядит точно так же).

Слева тест для $F_s = 44.1$ кГц, справа для $F_s = 48$ кГц:



USB вход для сравнения. Слева тест для $F_s = 44.1$ кГц, справа для $F_s = 48$ кГц:



Цель данного теста – показать чувствительность SPDIF приемника к неизбежно возникающему в линии джиттеру данных. В идеальном случае малые пики равномерны и имеют такую же амплитуду, как и в спектре исходного файла. В этом смысле спектр с USB входа имеет вид, близкий к образцовому.

Помимо своего прямого назначения, этот тест (как и любой интенсивный высокочастотный сигнал) позволяет косвенно судить и о других компонентах джиттера:

Можно отметить отсутствие дополнительного уширения основания большого центрального пика. Это косвенно говорит о незначительном уровне фазового шума восстановленного блока (случайного джиттера).

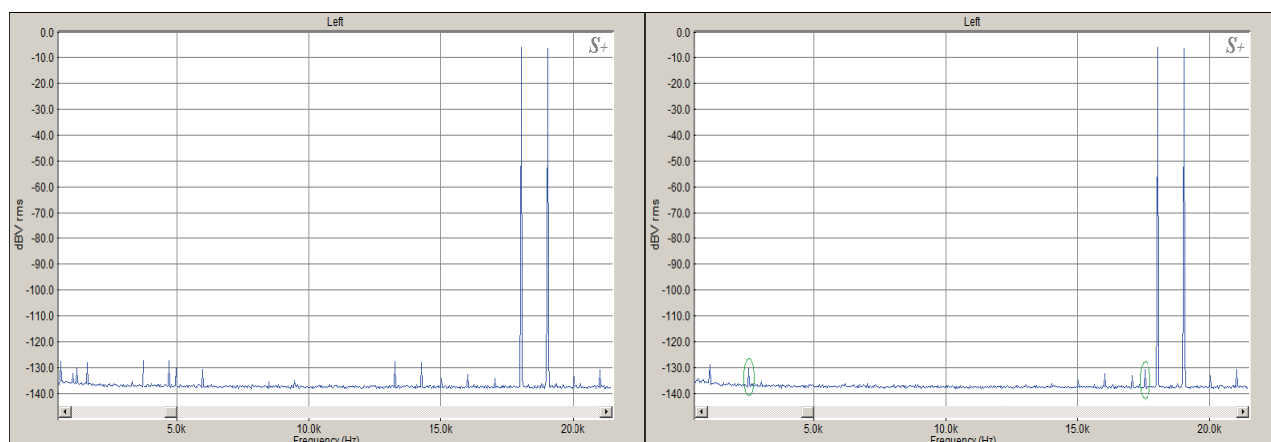
Отсутствие дополнительных пар пиков, *симметричных* относительно центрального, указывает на отсутствие джиттера наведенного внешними периодическими помехами (например, сеть, источники импульсного питания, микроконтроллеры и т.п.).

Дополнительные *несимметричные* относительно основного тона пики малой амплитуды (ВЧ компоненты джиттера, "завернувшиеся" из-за пределов звукового диапазона) в данном случае – это следствие особенностей работы WM8804. Подобные пики могут занимать разное положение на спектре, путем некоторых ухищрений их можно сделать невидимыми на тестовом сигнале ;), подчас их списывают на особенности АЦП ;). В данном устройстве *суммарная* относительная мощность таких пиков не превышает -125 дБ, что заметно ниже уровня шума ЦАП и соответствует джиттеру менее 10 пс. Стоит отметить, что данные артефакты должны наблюдаться только в присутствии экстремально мощных ВЧ сигналов, вроде представленного J-теста, или теста на интермодуляционные искажения.

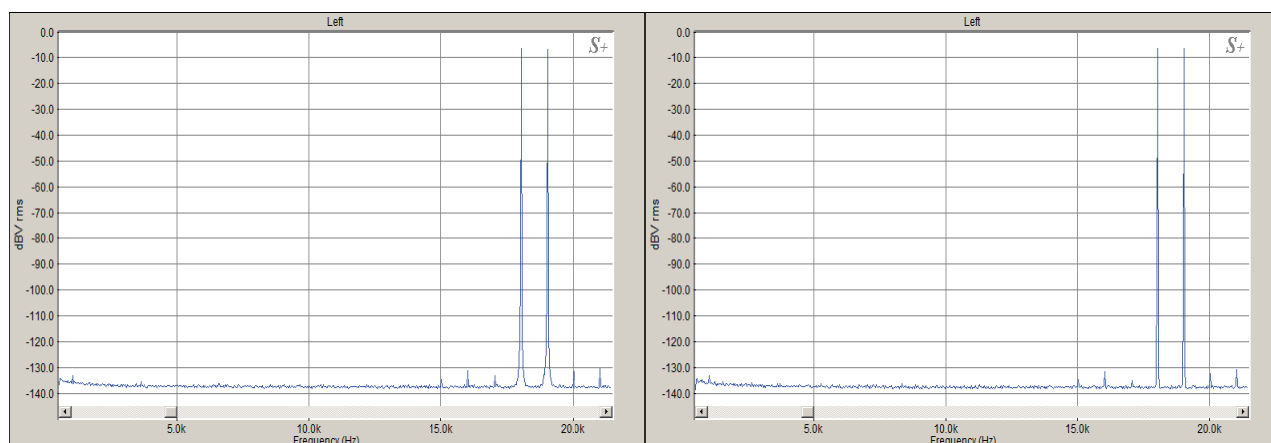
2. Интермодуляционные искажения.

Максимальная амплитуда сигнала соответствует полной шкале преобразования ЦАП (каждая из компонент имеет уровень -6дБ), частоты 18 кГц + 19 кГц, глубина 24 Бита, дизеринг.

Слева TOSLINK, $F_s = 44.1$ кГц, справа коаксиальный вход, $F_s = 96$ кГц:



Слева TOSLINK, $F_s = 192$ кГц, справа USB $F_s = 192$ кГц:



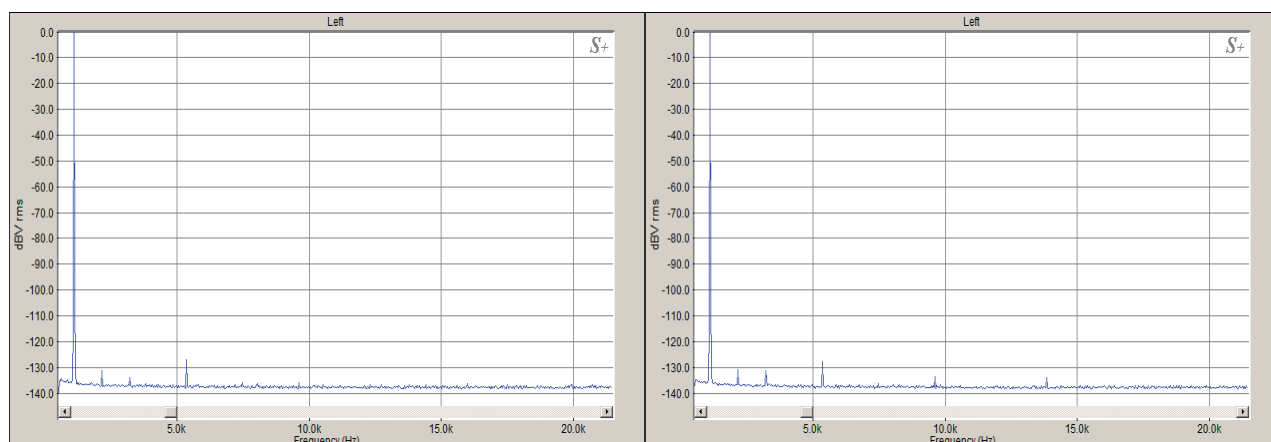
Тест, достаточно жесткий для того, чтобы на спектрах с $F_s = 44.1$ кГц стали заметны типичные для многих ЦАП отражения тестовой пары частот, правда, с малой интенсивностью (ниже уровня шума).

Помеченные зеленым пики на спектрах с $F_s = 96$ кГц – это не искажения, а подмешанные в тестовый сигнал дополнительные частоты уровнем -130 дБ. Делалось это с целью верификации способности корректно измерять столь малые уровни продуктов искажений ЦАП.

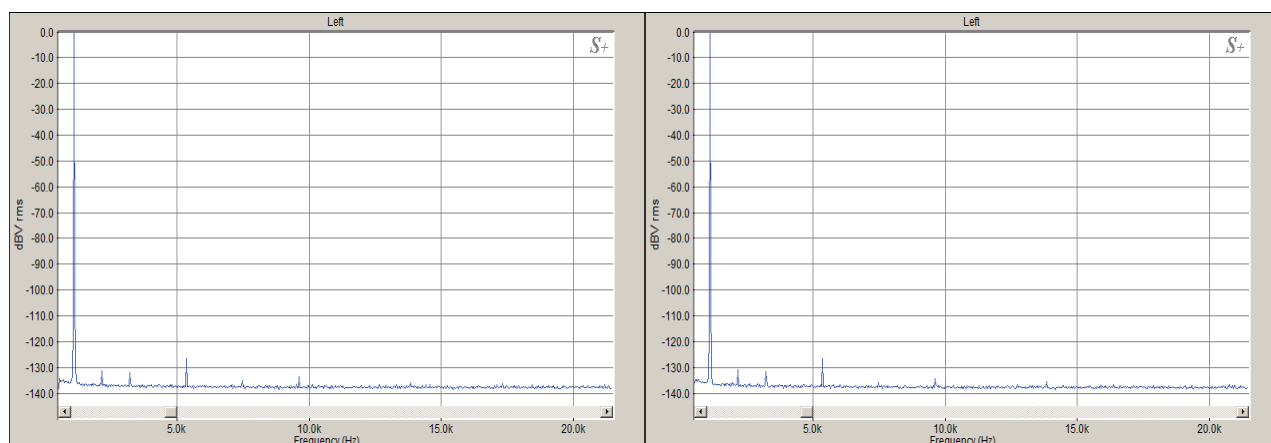
3. Гармонические искажения

Амплитуда сигнала соответствует полной шкале преобразования ЦАП, частота 1063 Гц, глубина 24 Бита, дизеринг.

Слева вход TOSLINK, $F_s = 44.1$ кГц, справа коаксиальный вход, $F_s = 96$ кГц:



Слева TOSLINK, $F_s = 192$ кГц, справа USB $F_s = 192$ кГц:



Как нетрудно убедиться, данный тест достаточно легкий, и описываемый SPDIF модуль не приносит никаких артефактов в измеренный сигнал. Суммарный уровень гармоник неизменно остается заметно ниже -120 дБ, дополнительных тонов не наблюдается.

4. Шумовая полка. Отдельное измерение при воспроизведении сигнала уровнем -60 дБ.

Уровень шумов АЦП в этом измерении не ограничивает спектр снизу, и нижняя линия спектра иллюстрирует шум ЦАП с подключенным модулем SPDIF. Невзвешенный уровень шума в звуковой полосе чуть лучше -110 дБ. Некоторый подъем на ВЧ – кажущийся, он обусловлен особенностями графического представления данных в логарифмическом масштабе.

