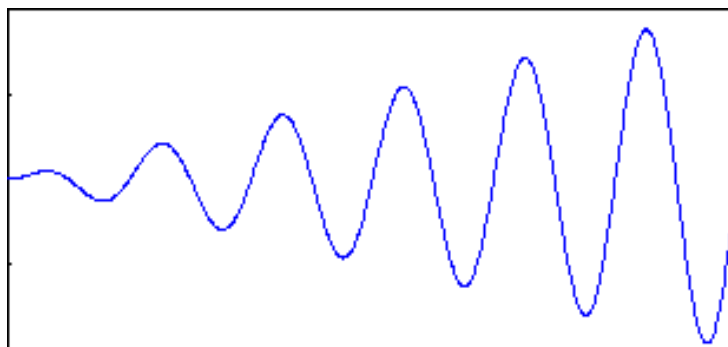


<Биты и Время>

©2013, Александр Торрес.

Просматривая интернет, и читая различные форумы, видно, что многие любители аудиотехники не очень ясно представляют себе процессы, происходящие при передаче цифровых данных и воспроизведении цифровых записей. Данное изложение будет сделано максимально упрощенно, без “тройных интегралов” и Фурье-анализа. Его цель – дать общее представление о том, что такое «битперфект» и «джиттер», вокруг которых наворочено огромное количество мифов и шизотерии.

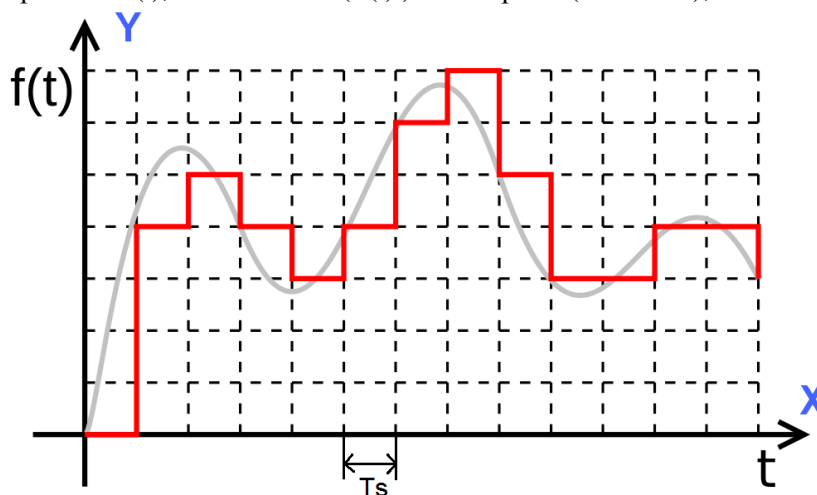
Как известно, аналоговый аудио сигнал можно представить в виде временного графика напряжения, тока, звукового давления и т.п. при передаче сигналов чаще всего оперируют с напряжением.



<рис1. график аналогового сигнала>

Цифровой аудио сигнал представляет собой аналогичный график, только не сплошной, а дискретный – каждая точка графика соответствует определенному напряжению в конкретный момент времени. Это называется «отсчет». Интервалы между отсчетами, как правило, постоянны, и равны периоду частоты дискретизации. В аудиотехнике ее обычно обозначают F_s (интервал соответственно, $T_s = 1/F_s$).

Таким образом, мы видим, что как аналоговый, так и цифровой сигналы характеризуются двумя координатами – временем (t), и величиной ($f(t)$) в это время (отсчетом), или X и Y .



<рис 2. график дискретного сигнала>

Огромным преимуществом цифровых (дискретных) сигналов перед аналоговыми, является то, что их можно хранить, копировать и передавать на любое расстояние абсолютно без искажений, в неизменном виде. При этом следует понимать разницу между «хранением» и «передачей». Для хранения, достаточно записать данные на носитель информации (дискету, жесткий диск, флэш-память, оперативную память и т.п.) в точном соответствии с исходными данными (Y) и в строгом порядке. При этом непосредственно X не хранится, просто предполагается, что время между двумя соседними данными равно T_s . Т.к. одни и те же данные могут быть воспроизведены с

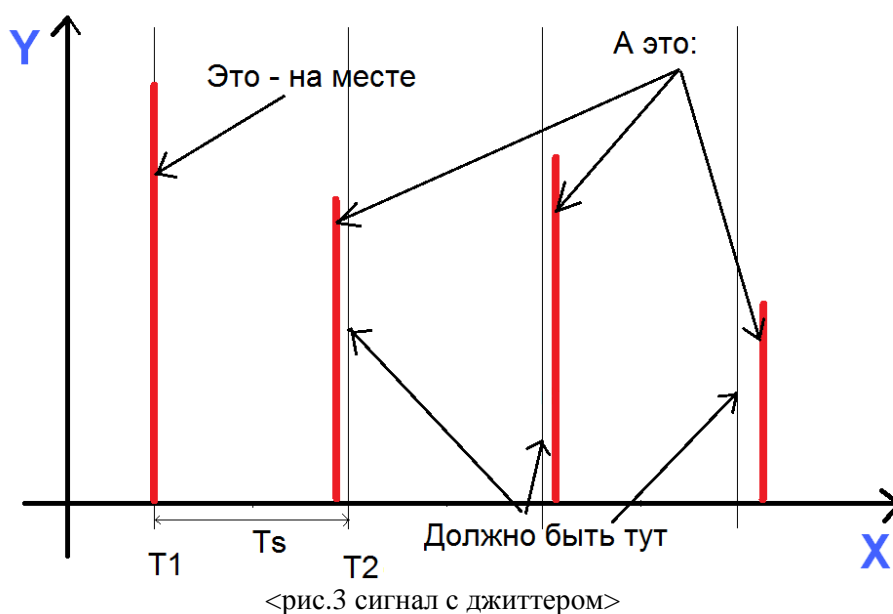
разной скоростью, крайне важно знать заранее частоту дискретизации (F_s). Обычно она хранится в заголовке файла (при хранении на диске) или предполагается по умолчанию (на Audio-CD Она равна 44.1кГц).

При копировании данных, достаточно лишь точно переписывать их из одного места в другое, сохраняя величину и порядок (поэтому рассуждения одного «бывшего питерского инженера» о том, что «аудио сигнал портится при передаче его на большое расстояние, особенно по интернету» – это сами понимаете что **Ж**). А недавно я прочитал на одном из «форумов», что «залил сграбленный диск на сервер, потом скачал его обратно – и скачанный файл звучит хуже, чем тот, что оставался у меня на компе». Комментарии тут, понятное дело, излишни.

А вот при воспроизведении, т.е. переводе дискретного сигнала в аналоговый, уже не все так просто. Конечно, данные нужно передавать правильно - если в данный момент времени напряжение равно 1247, то передавать (и принимать!) нужно именно 1247. Не 1246, не 1248, и тем более не 2759 – только 1247! Это называется «битперфект».

Но одного этого мало – нужно чтобы это число поступило в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП, DAC) точно в нужное время, определяемое частотой дискретизации. Именно об этом часто забывают, задавая вопросы типа «как же может портиться звук, ведь нолики и единички те же самые?!».

Т.е. если одно число поступило в момент T_1 , то следующее должно поступить в момент $T_2 = T_1 + T_s$.



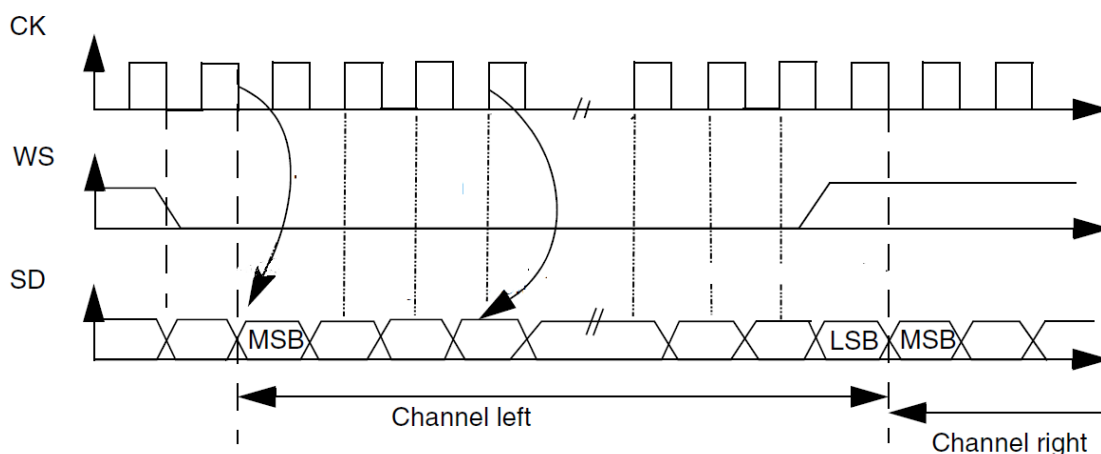
Одним словом, к T_s предъявляются два условия:

1) T_s должно быть равным исходному T_s с большой точностью. Обычно, временной интервал генерируется тактовым генератором, с требуемыми делителями частоты. Его длительность должна быть равной длительности интервала, использовавшегося при записи. Поскольку двух одинаковых генераторов не бывает, их частоты должны быть максимально близки, в противном случае будет заметное на слух изменение темпа и тональности. (Вспомните магнитофон – если записанное на 9.53 прослушать на 19.05, то звучать все будет вдвое быстрее и выше, но это крайний случай. (В плохо отрегулированном магнитофоне, если скорость даже немного отличается – это прекрасно слышно всем).

К счастью, точность частоты даже плохих кварцевых генераторов составляет не более 100-200ppm, т.е. разность частот двух плохих генераторов в худшем случае (отклонения максимальны и противоположны по знаку) не более 400ppm. Кто не очень понимает что такое «ppm», замечу, что 1000ppm это всего лишь 0.1%, а даже профессиональный музыкант или дирижер, с абсолютным слухом, способны различить отклонение тональности в единицы процентов. Большинство генераторов имеет точность частоты 20-50ppm (что для аудиоцелей более чем достаточно), хотя в продаже и присутствуют «аудиофильские» генераторы, с рекламируемой точностью 0.1-1ppm. Ну что ж, зарабатывать деньги никому не возбраняется **Ж**

2) T_s должна быть постоянной, т.е. все время одинаковой. На практике, точность генератора характеризует среднее значение частоты за какое-то время. Но каким бы точным не был генератор, у него всегда есть определенное отклонение частоты, которое меняется хаотическим образом. Получается что $T_s = T_{s_const} + T_{s_var}$, где T_{s_const} – усредненное значение частоты, T_{s_var} – переменная составляющая. Это называется «фазовое дрожание» или джиттер (вспоминая опять про магнитофоны – джиттер немного напоминает детонацию), и в отличие от просто отклонения (точности), здесь речь уже не идет про десятки-сотни ppm, или десятые доли процента. Заметность джиттера существенно выше, и кроме того, характеризуется не только его величиной (в герцах, наносекундах и т.п.) но и его частотой, а еще точнее – спектральным распределением. Более низкочастотные составляющие джиттера более заметны, чем высокочастотные. Допустимая величина джиттера зависит от частоты дискретизации, но еще в большей степени – от разрядности сигнала. Для формата стандартного AudioCD (44.1/16) незаметный для слуха джиттер может достигать десятков наносекунд. Для форматов повышенного разрешения (96/24, 192/24) максимальная величина слышимости джиттера снижается до единиц/долей наносекунд.

Здесь есть один маленький нюанс, заключающийся во влиянии джиттера во время передачи и во время преобразования в аналог. Передача обычно осуществляется по той или иной синхронной шине, где данные передаются по линии данных и стробируются тактовым сигналом (все форматы передачи т.н. «аудиошин» - I2S, LJ, RJ, по сути, являются разновидностями шины SPI).



<рис 4 I2S>

Как видно на рисунке справа, данные (SD) стробируются положительным или отрицательным фронтом тактового сигнала (СК).

Для того чтобы передать информацию без искажений, фронт должен быть «внутри» данных. Т.е. в данном случае нам совершенно безразличен джиттер, до тех пор, пока отклонение длительности между фронтами не превышает половину самой длительности. Это огромный джиттер, такого в реальности не бывает. Однако при воспроизведении, как говорилось выше, допустимая величина джиттера намного меньше. На последней стадии, после передачи данных в ЦАП в момент преобразования, что, собственно, и является воспроизведением, эти два процесса соединены вместе, поэтому большой джиттер при этом недопустим.

Тем не менее, большинство цифровых источников звука обладает весьма ощутимым джиттером – используются недорогие кварцевые генераторы, часто используется один кварц, на частоту не кратную частоте семплирования, а необходимые частоты получаются из него методом ФАПЧ (PLL).

Большое влияние на величину джиттера имеет также передача цифрового потока бифазным кодированием через интерфейсы SPDIF (коаксиал) и TOSLINK (оптика). При этом, кроме возникновения джиттера непосредственно в процессе передачи (особенно в оптике), на величину джиттера влияет восстановление тактового сигнала на приемной стороне методом той же ФАПЧ.

В заключение, рассмотрим несколько методов исключения (или уменьшения) джиттера и его влияния на звуковой сигнал. Для полного их описания потребуется по несколько страниц на каждый, поэтому ограничимся перечислением и краткой справкой:

- 1) Передача непосредственно шины I2S, минуя кодер-декодер SPDIF/TOSLINK. При этом исключаются все погрешности, связанные с кодированием и восстановлением сигнала, а величина джиттера зависит от качества тактового генератора источника (которые при необходимости, может быть заменен на более качественный). При использовании стандартных CD/DVD плееров, звуковых карт компьютеров, может потребоваться достаточно серьезная их доработка.
- 2) Передача по шине I2S, с внешним тактированием от высококачественного генератора, установленного непосредственно в ЦАПе. Исключается влияние генератора в источнике сигнала, а также появление джиттера во входных/выходных буферах, кабелях связи. Разумеется, также требуется доработка серийных источников, причем не во всех таких источниках она возможна.
- 3) Использование более современных приемников SPDIF с пониженным джиттером (например, DIR9001 вместо CS84xx). Не самая кардинальная, но одна из самых простых мер, не требующая вмешательства в источник сигнала.
- 4) Пересинхронизация – цифровые данные на входе ЦАПа пропускаются через регистр, где они стробируются высококачественным генератором ЦАПа. Не требует вмешательства в источник, обычно закладывается изначально в схему ЦАПа.
- 5) Использование специальных микросхем (например SRC4192, AD1890), которые предназначены в первую очередь для преобразования сигналов с одной частотой дискретизации в другую (ресемплинг). Их особенность в том, что выходные данные стробируются от генератора ЦАПа, асинхронно по отношению ко входным. Входная и выходная частоты могут быть и одинаковыми. При этом нет ресемплинга, но есть снижение джиттера. Недостаток – может потеряться «битперфектность», при преобразованиях и цифровой фильтрации в этих микросхемах.
- 6) Существуют специальные микросхемы «очистители тактового сигнала», уменьшающие джиттер. Но они дороги и их эффективность для аудиотехники под большим вопросом.
- 7) Использование новых видов носителей информации и устройств воспроизведения – медиаплееры, сетевые плееры, твердотельные (HDD, Flash) плееры, USB-интерфейсы к компьютерам – многие из них предусматривают внешнее тактирование от генератора в ЦАПе.
- 8) Использование буферной памяти FIFO – сигнал с источника (им может быть любой вид сигнала - SPDIF, TOSLINK, USB, I2S) запоминается в кольцевой памяти. Чтение из памяти, происходит под управлением тактового сигнала высококачественного генератора ЦАПа с некоторой задержкой. Память нужна для компенсации разницы частоты генераторов ЦАПа и источника. Как и во всех других способах с тактированием от генератора ЦАПа – происходит полное игнорирование джиттера источника.

Из перечисленного видно, что одни методы пригодны только для новых типов техники, другие могут быть использованы и со старой техникой (причем методы типа FIFO не потребуют даже ее модификации). Одни методы только снижают джиттера источника сигналов, другие его полностью устраняют, сводя вопрос джиттера к высококачественному генератору, расположенному непосредственно в ЦАПе. Для современных ЦАПов этот генератор является сигналом MCLK, к джиттеру которого они особенно чувствительны, или для пересинхронизации сигнала LRCK, к джиттеру которого чувствительны старые мультибитные ЦАПы.